



Приведены общие сведения о твердотельных, газовых и полупроводниковых лазерах. Рассмотрено применение различных типов лазеров в науке, технике, специальных технологиях, а также в медицине.

Ю.И. Колесник, А.В. Кипенский

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ



КОЛЕСНИК
Юрий Игоревич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная и биомедицинская электроника» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Автор более 75 научных и учебно-методических работ.

Специалист в области оптоэлектроники, микропроцессорного управления преобразователями электрической энергии и различными медицинскими аппаратами.

Проводит занятия по следующим учебным дисциплинам: «Промышленная электроника», «Микропроцессорная техника», «Оптоэлектроника», «Квантовая электроника», «Электронные устройства измерения и согласования сигналов».



КИПЕНСКИЙ
Андрей Владимирович

профессор кафедры «Промышленная и биомедицинская электроника» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», академик АН прикладной радиоэлектроники.

Автор более 200 научных и учебно-методических работ.

Специалист в области микропроцессорных систем импульсного управления и автоматического регулирования, применимых для преобразования параметров электроэнергии, автоматизации технологических процессов, медицинской диагностики и терапии. Читает лекции по дисциплинам: «Информационные устройства электронной медицинской аппаратуры», «Биометрия», «Электротерапевтические аппараты» и др.

Серия «Физическая и биомедицинская электроника»

Ю.И. Колесник, А.В. Кипенский

**КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА.
ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ**

**Учебное пособие
для студентов специальностей: 7.090803 «Электронные системы»,
7.090804 «Физическая и биомедицинская электроника»
дневной и заочной форм обучения**

Харьков 2005

УДК 621.375.826
ББК 32.86 – 5
К60

Утверждено методическим советом
Национального технического университета «ХПИ»
в качестве учебного пособия
(протокол № 4 от 02.06. 2005 г.)

Рецензенты

В.П. Себко, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы и методы неразрушающего контроля» Национального технического университета «ХПИ».

Н.И. Афанасьева, д-р мед. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института медицинской радиологии АМНУ.

А.М. Коробов, канд. ф-м. наук, Президент научно-производственной медико-биологической корпорации «Лазер и здоровье».

К60 Колесник Ю.И., Кипенский А.В. Квантовая электроника. Применение лазеров: Учеб. пособие. – Харьков, 2005. – 156 с. – Рус. яз.

ISBN

Приведены общие сведения о твердотельных, газовых и полупроводниковых лазерах. Рассмотрено применение различных типов лазеров в науке, технике, специальных технологиях, а также в медицине.

Пособие предназначено для студентов специальностей 7.090803 «Электронные системы» и 7.090804 «Физическая и биомедицинская электроника» дневной и заочной форм обучения.

Наведені загальні відомості про твердотілі, газові та напівпровідникові лазери. Розглянуто застосування різних типів лазерів в науці, техніці, спеціальних технологіях, а також в медицині.

Посібник призначений для студентів спеціальностей 7.090803 «Електронні системи» та 7.090804 «Фізична та біомедична електроніка» денної та заочної форм навчання.

Лл. 74. Табл. 12. Бібліог. 26 назв.

УДК 621.375.826
ББК 32.86 – 5

ISBN

© Ю.И. Колесник, А.В. Кипенский, 2005

ПРЕДИСЛОВИЕ

Квантовая электроника – это современная область электроники, охватывающая изучение и разработку методов и средств усиления и генерации электромагнитных колебаний на основе эффекта вынужденного излучения атомов, молекул и твердых тел.

Наиболее крупным прикладным разделом квантовой электроники является *лазерная техника*, связанная с созданием лазеров различных типов, исследованием свойств лазерного излучения и его использованием для решения различных практических задач.

Содержание дисциплины «Квантовая электроника» соответствует учебному плану подготовки бакалавров направления 6.0908 «Электроника» высших учебных заведений и кафедр IV уровня аккредитации. «Квантовая электроника» входит в цикл фундаментальных дисциплин, читаемых студентам. Поэтому современный инженер электронной техники не может обходиться в своей деятельности без знаний основ квантовой электроники, принципов построения различных устройств с использованием лазеров.

«Квантовая электроника» опирается на сведения, полученные при изучении дисциплин «Физика», «Физическая химия», «Вакуумная и плазменная электроника», «Твердотельная электроника» и других.

Предлагаемая вниманию читателя книга является завершающей частью методического обеспечения дисциплины «Квантовая электроника», состоящего из двух учебных пособий.

В *первое учебное пособие*, вышедшее в свет в 2004 году, вошли следующие разделы: физические основы квантовой электроники; квантовые усилители и оптические резонаторы; принцип действия твердотельных, газовых и полупроводниковых лазеров; квантовые приборы оптоэлектроники.

Во *втором учебном пособии* рассмотрено применение лазеров в науке и технике, использование лазеров в современных технологиях и медицине.

В учебных пособиях собраны расширенные и отредактированные лекции, которые в течение последних лет читаются доцентом Ю.И. Колесником для студентов, изучающих дисциплину «Квантовая электроника» и

обучающихся по специальностям 7.090803 – «Электронные системы» и 7.090804 – «Физическая и биомедицинская электроника» на кафедре «Промышленная и биомедицинская электроника» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Кроме того, во второе учебное пособие включены материалы, подготовленные профессором Кипенским А.В. для дисциплины «Физиотерапевтические аппараты».

Разделы 1-4 данного пособия написаны доцентом Колесником Ю.И.

Раздел 5 написан профессором Кипенским А.В.

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, сделанные в ходе редактирования рукописи: доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой «Приборы и методы неразрушающего контроля» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» Себко Вадиму Пантелевичу; доктору медицинских наук, профессору, ведущему научному сотруднику Института медицинской радиологии АМНУ Афанасьевой Натальи Ивановне; кандидату физико-математических наук, Президенту научно-производственной медико-биологической корпорации «Лазер и здоровье» Коробову Анатолию Михайловичу. Отдельная благодарность доктору технических наук, профессору Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» Долбне Виктору Тимофеевичу за ценные рекомендации по улучшению структуры и содержания пособия.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛАЗЕРАХ

Лазер или *оптический квантовый генератор* – техническое устройство, испускающее электромагнитное излучение в виде направленного высоко-когерентного монохроматического пучка. Слово «лазер» – аббревиатура английского термина «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», что в переводе обозначает усиление света в результате вынужденного излучения [1].

В понятие *лазерной техники* входят научные рекомендации и технические решения, при выполнении которых создаются разнообразные приборы и устройства квантовой электроники.

Первые шаги к созданию лазеров начались с фундаментальных работ А.Эйнштейна, опубликованных в 1917 г., «Испускание и поглощение излучения по квантовой теории» и «К квантовой теории излучения». Следующий важный шаг на пути к созданию лазера сделали В.А.Фабрикант с сотрудниками, получившие в 1951 г. свидетельство на изобретение способа усиления излучения за счет использования вынужденного испускания. Вскоре этот способ усиления излучения был реализован отнюдь не в оптическом диапазоне, а в диапазоне сверхвысоких частот.

В 1954 г. был создан молекулярный генератор, названный вскоре *мазером* (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation – усиление микроволн в результате вынужденного излучения). Его разработали и создали независимо и практически одновременно два коллектива ученых – советские ученые, работавшие в Физическом институте АН СССР под руководством Н.Г.Басова и А.Л.Прохорова, и американские ученые, работавшие в Колумбийском университете в США под руководством Ч.Таунса.

В последствии от термина «мазер» произошел термин «лазер» в результате замены буквы «М» (начальная буква слова Microwave – микроволновый) на букву «L» (начальная буква слова Light – свет).

Первый лазерный аппарат был создан в 1960 г.: успех выпал на долю Т.Меймана. Ему удалось получить на рубине генерацию излучения в оптическом диапазоне. В этом же году американским физикам А.Джавалу, В.Беннету, Д.Эрриоту удалось получить генерацию когерентного оптического излучения в электрическом разряде в смеси неона и гелия. Так появились первые гелий-неоновые лазеры.

В 1964 г. Н.Г.Басов, А.Л.Прохоров и американский физик Ч.Таунс были удостоены Нобелевской премии по физике.

В 1966 г. К.Пател (США) создал первый лазер на смеси углекислого газа и азота (СО₂ лазер).

В основе действия лазера лежит принцип накопления световой энергии с последующим высвобождением ее в виде монохроматического луча. Наиболее характерными свойствами излучения являются высокая когерентность, монохроматичность, малая расходимость луча, высокая энергетическая мощность.

Существенным достижением в науке и технике стало создание полупроводниковых лазеров на основе гетеропереходов. Эти лазеры работают при комнатных температурах без систем охлаждения и термостабилизации.

За цикл работ в области лазеров на основе гетеропереходов в 2000 году российскому ученому Ж.И.Алферову была присуждена Нобелевская премия по физике.

Как известно, по типу активного вещества лазеры бывают твердотельными, жидкостными, газовыми, полупроводниковыми.

Кратко рассмотрим принципы действия этих лазеров.

1.1. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Чтобы практически получить индуцированное (вынужденное) излучение, следует выполнить три основных условия, которые фактически и описывают модель твердотельного лазера (рис. 1.1) [1, 3, 6].

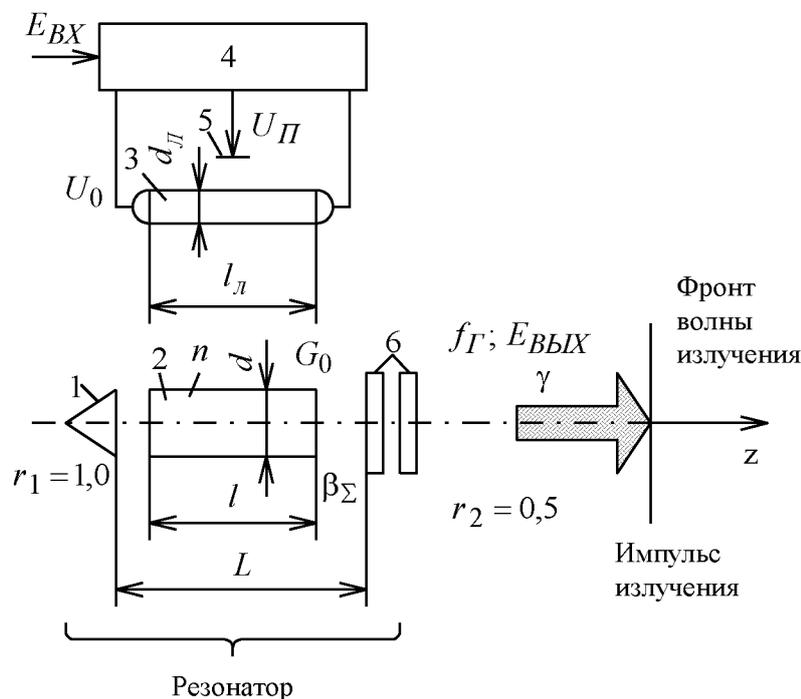


Рисунок 1.1 – Модель твердотельного импульсного лазера:

- 1 – призма полного внутреннего отражения; 2 – активное вещество;
- 3 – импульсная лампа накачки; 4 – устройство накачки; 5 – электрод поджига;
- 6 – резонансный отражатель (стопа пластин); E_0 , $E_{ВХ}$, $d_{л}$, $l_{л}$, η , r_2 , L , d , n , l , G_0 , β_{Σ} , γ , $E_{\text{АУО}}$ – параметры и характеристики лазера

1. Необходимо иметь вещество с **инверсией населенностей** $\Delta N = N_n - N_m$, то есть, чтобы из двух выбранных уровней верхний уровень был заселен электронами больше, чем нижний, где N_n, N_m – населенности уровней энергии E_n, E_m . Инверсия населенности достигается накачкой, одним из универсальных методов которой является оптическое возбуждение частиц (метод оптической накачки).

2. Активное вещество необходимо поместить в оптический резонатор – систему двух параллельных зеркал, чтобы осуществить положительную обратную связь. В результате этого часть излучаемой энергии, распространяясь внутри активного вещества, усиливается за счет вынужденного испускания фотонов все новыми и новыми атомами, вовлекаемыми в процесс излучения.

3. Усиление $G(\nu)$, даваемое активным веществом, должно быть больше некоторого суммарного порогового значения потерь β_Σ в резонаторе, определенного для каждого активного твердого вещества. Генерация будет возможна при выполнении условия самовозбуждения:

$$G(\nu)L \geq \beta_\Sigma. \quad (1.1)$$

В соответствии с этими тремя условиями, лазер состоит из трех основных элементов: **активного вещества** – источника индуцированного излучения; **системы накачки**, которая возбуждает активное вещество, и **резонатора** – системы, поддерживающей колебания и формирующей частотные, энергетические и пространственные характеристики выходного излучения.

Большинство твердотельных лазеров работает в импульсном режиме.

В твердотельных лазерах используются **трех- и четырехуровневые системы** энергетических уровней (рис. 1.2).

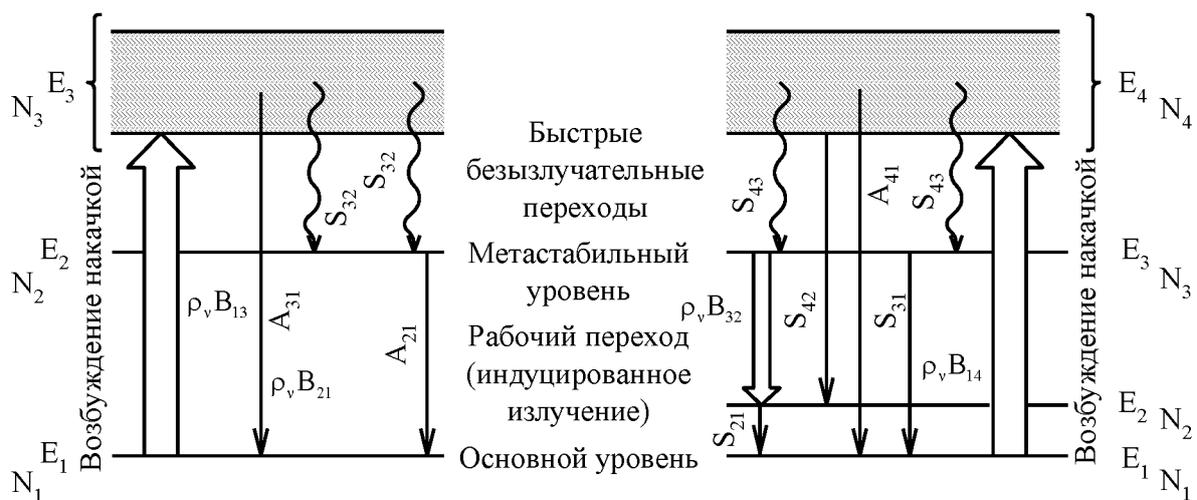


Рисунок 1.2 – Схемы квантовых переходов в трех- и четырехуровневом лазере

В первой, трехуровневой системе излучение оптической накачки переводит квантовые частицы в широкую полосу поглощения E_3 , затем атомы быстро переходят на метастабильный уровень E_2 .

Если мощность накачки достаточна, между основным уровнем E_1 и уровнем E_2 возникает инверсия населенностей. Генерация вынужденного излучения происходит при переходе с метастабильного уровня E_2 на основной (либо с уровня E_3 на вспомогательный уровень E_2 в четырехуровневой системе).

В общем случае изменение населенностей уровней обусловлено тремя квантовыми механизмами: спонтанными переходами на нижние уровни; индуцированным излучением и поглощением; безызлучательными переходами, возбуждаемыми тепловыми процессами и взаимодействиями с колебаниями кристаллической решетки.

По трехуровневой системе работает лазер на *рубине*. Недостаток его состоит в том, что для создания инверсии населенностей должно быть переведено из основного на метастабильный уровень более 50 % квантовых частиц. Поэтому каждый из возбужденных атомов отдает большую часть энергии накачки (80-85 %) на нагрев кристаллической решетки при безызлучательных переходах $E_3 \rightarrow E_2$.

Четырехуровневая система, по которой работают многие твердотельные лазеры (на стекле, активированном редкоземельными элементами, антинидами, YAG и др.), более эффективна. Если уровень E_4 расположен достаточно далеко от основного E_1 , то его населенность будет меньше населенности основного уровня, и инверсия населенностей между уровнями E_2 и E_4 может быть достигнута при относительно низких мощностях накачки.

После создания рубинового лазера было предложено много лазеров на других материалах, однако рубиновый лазер широко используется в настоящее время и, видимо, будет использоваться в будущем. Это объясняется следующими обстоятельствами: излучение его происходит в видимой части спектра, кристаллу при генерации импульсов с частотой $f_{\lambda} \approx 0,03$ Гц не требуется охлаждение, обеспечивается высокая выходная мощность в режиме генерации импульсов с модулированием добротности ($P_{\text{АУО}} = 7500$ МВт при длительности импульса 2 нс).

Наряду с рубиновыми лазерами широкое распространение получили лазеры на стеклянной основе, обладающие рядом таких достоинств, как практически неограниченные линейные размеры стержней (6-200 см), простота изготовления образцов любой формы, высокая оптическая однородность, простота массового производства. В то же время по сравнению с ионными кристаллами они имеют более низкую теплопроводность и более высокий коэффициент теплового расширения, что затрудняет разработку

импульсных лазеров с большой частотой повторения.

В настоящее время созданы лазеры на стекле, активированном ионами неодима, иттербия, эрбия, гольмия, туллия, европия, диспрозия и других.

Лучшим является *неодимовый лазер*. Диаграмма энергетических уровней ионов неодима достаточно сложна, поэтому обычно принимают во внимание те уровни, которые играют существенную роль в процессе генерации, то есть четырехуровневую модель состояний (рис. 1.3).

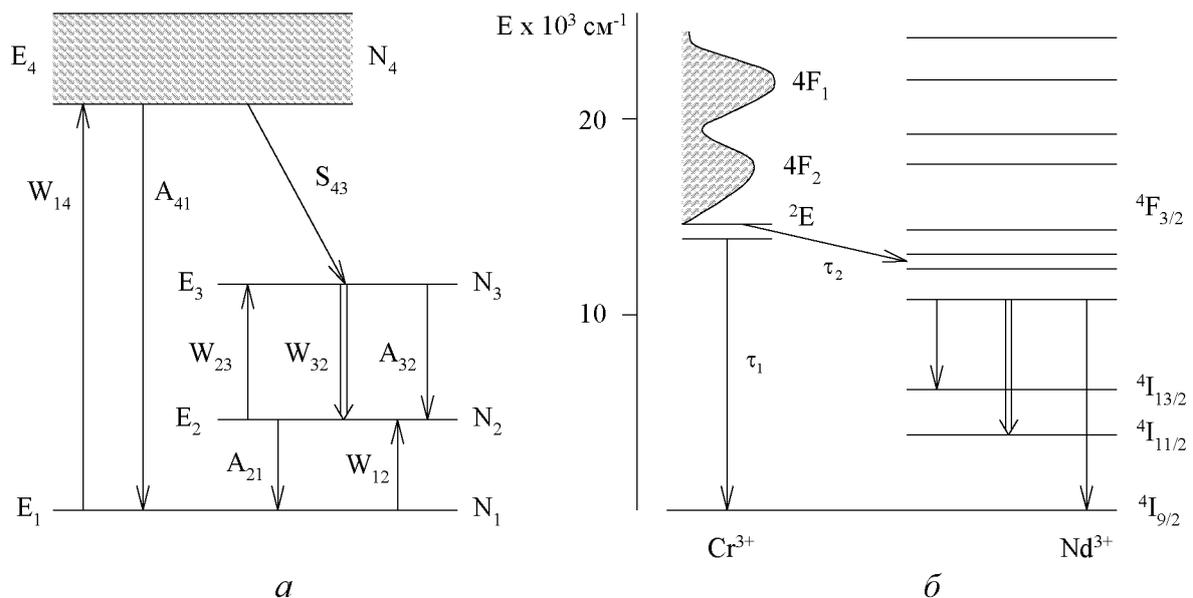


Рисунок 1.3 – Модель энергетических состояний активного вещества четырехуровневого лазера (а) и схема уровней энергии ионов Cr^{3+} и Nd^{3+} в кристалле YAG (б)

В этой модели уровень E_1 – основное состояние, E_2 – конечный уровень, E_3 – метастабильный уровень, E_4 – совокупность всех конечных состояний для поглощения излучения накачки, что приводит к возбуждению квантовых частиц с уровня E_1 на уровень E_4 .

Время жизни частиц в возбужденном состоянии в зависимости от температуры, состава стекла и концентрации неодима изменяется от 10^{-3} до 10^{-5} с. Затем возбужденные частицы безизлучательно переходят на метастабильный уровень E_3 . Время жизни на этом уровне приблизительно равно 10^{-3} с.

Рабочий переход (генерация) между уровнями E_3 и E_2 соответствует длине волны $\lambda_0 = 1,06$ мкм. При переходе $E_4 \rightarrow E_3$ создается инверсия населенностей ΔN . Уровень E_2 расположен выше основного уровня E_1 примерно на 2000 cm^{-1} . Чтобы исключить тепловые переходы с уровня E_1 на уровень E_2 , должно быть выполнено условие $(E_2 - E_1) \gg kT$ или

$(E_2 - E_1) \geq kT$. При термодинамическом равновесии населенность уровня E_2 очень мала, так как уровень E_2 не заполнен. Поэтому для создания инверсии населенностей $\Delta N = (N_3 - N_2)$ в четырехуровневом активном веществе требуется значительно меньше энергии возбуждения по сравнению с трехуровневой системой. При этом четыре кинетических уравнения (рис. 1.3,*a*), описывающих процесс генерации с учетом ограничений:

$$N_1 \gg N_4; \quad \frac{dN_4}{dt} \rightarrow 0; \quad S_{43} \gg W_{14}, \quad (1.2)$$

где $W_{14} = B_{14} \rho_\nu$, можно преобразовать в уравнения нестационарного режима

$$\frac{d(N_3 - N_2)}{dt} = W_{14}(N_0 - \Delta N) - (W_{32} + A_{32})\Delta N, \quad (1.3)$$

или стационарного режима

$$\Delta N = \frac{W_{14}N_0}{W_{14} + W_{32} + A_{32}} \quad (1.4)$$

и рассчитать инверсию населенностей и пороговое значение мощности накачки [1]:

$$P_H \text{ и } \ddot{E} = \frac{N_0 S l h \nu_H \delta m p}{\tau_\lambda \eta \dot{\gamma} b \eta_0 \eta_{\ddot{e}}}. \quad (1.5)$$

Наиболее перспективным по своим возможностям и применению в настоящее время является твердотельный лазер на иттрий – алюминиевом гранате (YAG) с примесью неодима. Это четырехуровневая система, химический состав которой $Y_3Al_5O_{12} (Nd^{3+}; Cr^{3+}; Nd^{3+}; Ho^{3+}; Er^{3+}; Yb^{3+})$. Кристалл граната составляет матричную основу, активаторами являются перечисленные выше редкоземельные элементы. Структура кристалла имеет объемно-центрированную кубическую решетку. YAG, активированный ионами $Nd^{3+} : Cr^{3+}$, является уникальным лазерным материалом, так как обладает хорошей теплопроводностью, большой твердостью и хорошими оптическими характеристиками.

Кроме того, он является единственным твердым активным веществом, на котором удалось получить в непрерывном режиме мощность более 1 кВт. Полосы поглощения ионов Nd^{3+} в гранате расположены от 11500

до $\sim 25000 \text{ см}^{-1}$ и соответствуют длинам волн от 0,88 до 0,4 мкм.

В зависимости от условий работы бывают одно- и многомодовые лазеры, причем в одномодовом режиме мощность генерации снижается втрое. В импульсном режиме частота посылки импульсов достигает 10^8 - 10^9 Гц, с пиковой мощностью 30-300 кВт и длительностью импульсов 30 нс. Лазеры на YAG генерируют также ряд других волн излучения 0,94; 1,05-1,12; 1,34-1,4 мкм.

Срок службы твердотельных лазеров определяется сроком службы лампы накачки и достигает 1500 ч. Получена непрерывная генерация в лазере на вольфрамите кальция, активированном трехвалентным неодимом: $\text{CaWO}_4(\text{Nd}^{3+})$, на длинах волн 1,058 и 1,065 мкм при температуре 300 и 85 К соответственно. Выходная мощность такого лазера составляет от 10 мВт до 1 Вт.

1.2. ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Газовыми называются лазеры, в которых активной средой является газ, смесь нескольких газов или смесь газа с парами металла. Особенностью активной среды, находящейся в газовой фазе, является ее высокая оптическая однородность, что позволяет применять большие оптические длины резонатора и вследствие этого получать высокую направленность и монохроматичность излучения. Другая особенность такой активной среды – ее малая плотность, в результате чего энергетический спектр активных частиц (атомов, ионов, молекул) не искажается из-за взаимодействия с соседними активными частицами. Поэтому энергетические уровни в спектре газов узкие, что позволяет сосредоточить энергию излучения газового лазера в нескольких или даже одной модах [1, 2, 6].

При соответствующем выборе активной среды в газовых лазерах можно осуществить генерацию в любой части спектра – от ультрафиолетовой области ($\lambda \approx 0,2$ мкм) до далекой инфракрасной области излучения ($\lambda \approx 0,4$ мм).

Большим достоинством газовых лазеров является их способность работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Эти лазеры характеризуются большим диапазоном мощностей излучения (порядка 100 кВт) и высоким коэффициентом полезного действия (1,5-15 %).

Первыми были созданы газовые лазеры, возбуждаемые электрическим разрядом, направленным вдоль оптической оси резонатора, и получившие название *газоразрядных*.

Различают три типа газоразрядных лазеров, где в качестве активных частиц используют нейтральные атомы, ионы и молекулы газов. Механизмы возбуждения этих частиц различны.

В *лазерах на нейтральных атомах* основным механизмом возбуждения является неупругое столкновение электрона с атомом (столкновения

1-го рода). Этот механизм используют для возбуждения атомов неона, аргона, криптона и ксенона, а также паров свинца, марганца, меди. Другим важным механизмом является резонансное возбуждение атомов – неупругое столкновение возбужденных атомов одного газа с атомами другого (столкновения 2-го рода). Этот механизм эффективен тогда, когда энергия метастабильного уровня первого газа близка к энергии возбужденного уровня атомов другого газа. Характерным примером активной газовой среды, возбуждаемой таким образом, является смесь гелия с неоном ($\lambda_0 \approx 0,6328$ мкм; 1,15 мкм).

Наиболее эффективным процессом возбуждения *ионных лазеров* непрерывного действия является опустошение нижнего лазерного уровня за счет спонтанного излучения и соударения возбужденных ионов со стенками кюветы. Высокая населенность верхнего лазерного уровня обеспечивается в результате соударения ионов с быстрыми электронами в газовом разряде. Активным веществом в ионном лазере может быть инертный газ: аргон ($\lambda_0 \approx 0,48$ мкм), криптон ($\lambda_0 \approx 0,56$ мкм), неон ($\lambda_0 \approx 0,23$ мкм; 0,33 мкм), пары различных химических элементов (кадмия, цинка, йода $\lambda_0 \approx 1,01$ мкм), а также ионы фосфора ($\lambda_0 \approx 0,42$ мкм), серы ($\lambda_0 \approx 0,53$ мкм), хлора ($\lambda_0 \approx 0,7$ мкм), брома ($\lambda \approx 2,8$ мкм) и других элементов.

В *молекулярных лазерах* инверсия населенностей происходит под влиянием различных процессов (соударений молекул с быстрыми электронами, неупругих столкновений молекул различных газов в рабочей смеси, диссоциации и др.), которые качественно подобны процессам возбуждения на нейтральных газах. Наиболее распространенными рабочими веществами в молекулярных лазерах, использующих энергию колебательного и вращательного состояния, являются азот и углекислый газ (CO_2 , $\lambda \approx 10,6$ мкм) в смеси с азотом и гелием.

Газовые лазеры могут возбуждаться не только продольным электрическим разрядом. Большие мощности излучения обеспечивают *газодинамические*, химические, электроионизационные и ТЕА-лазеры («Transversely Excited, Atmospheric Pressure»), газовые импульсные лазеры, работающие при высоком давлении и возбуждаемые поперечным электрическим разрядом с плотностью тока около 300 А/см^2 .

Типичным лазером на *нейтральных атомах* является *газоразрядный гелий-неоновый лазер*, в котором используется смесь гелия и неона в соотношении примерно $10 : 1$; $5 : 1$, при общем давлении в газоразрядной трубке около 130 Па. Индуцированное излучение создается атомами неона, а атомы гелия участвуют лишь в передаче энергии к атомам неона (рис. 1.4). При возбуждении газовой смеси электрическим током (постоянным или переменным с частотой около 30 МГц) возникает тлеющий разряд, подобный разряду в «рекламной» газовой лампе. В электрическом разряде часть атомов неона переходит с основного уровня E_1 на долгожи-

вущие возбужденные уровни E_4 и E_5 . Инверсия населенностей создается благодаря большой населенности этих уровней по сравнению с короткоживущим уровнем E_3 . В чистом неоне созданию инверсии населенности мешает метастабильный уровень E_2 , поэтому полезным оказалось введение в рабочую смесь гелия.

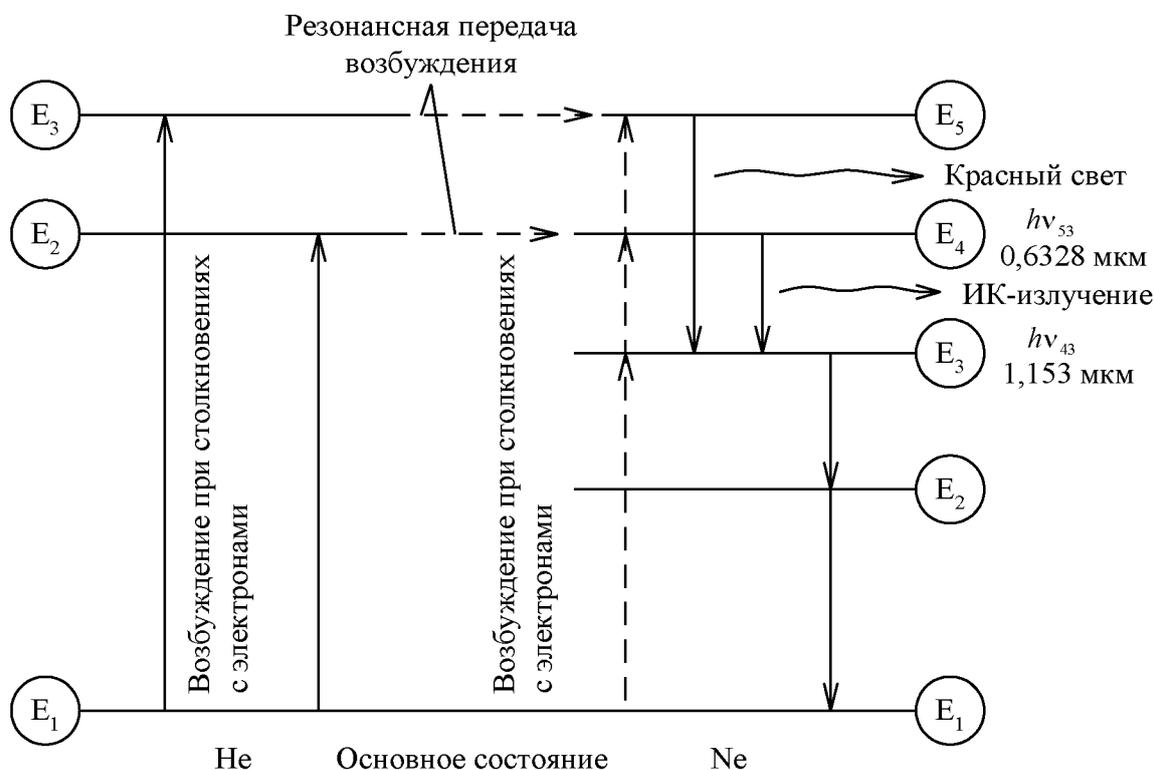


Рисунок 1.4 – Схема энергетических уровней гелий-неонового лазера

Под действием электрического разряда часть атомов гелия ионизируется и образуется плазма, содержащая электроны с большой кинетической энергией. Эти электроны, сталкиваясь с атомами гелия, переводят их из основного состояния E_1 на долгоживущие возбужденные уровни E_2 и E_3 , которые весьма близки к уровням E_4 и E_5 неона.

Поэтому при столкновениях возбужденных атомов гелия с невозбужденными атомами неона возникает высокая вероятность резонансной передачи возбуждения, в результате чего атомы неона оказываются на уровнях E_4 или E_5 , а атомы гелия возвращаются в основное состояние. Вероятность возбуждения атомов неона до уровней E_2 и E_3 за счет столкновений с атомами гелия мала, так как энергии этих состояний существенно отличаются от энергий уровней E_2 и E_3 гелия.

Таким образом, использование вспомогательного газа – гелия дает возможность осуществить дополнительное заселение энергетических уровней

неона и получить инверсию населенностей между уровнями E_3 и E_4 , E_5 .

Поскольку уровень E_3 неона является короткоживущим, то на переходах $E_4 \rightarrow E_3$ и $E_5 \rightarrow E_3$ можно получить непрерывную генерацию. Переходу $E_4 \rightarrow E_3$ соответствует генерация в ближней инфракрасной области с длиной волны 1,153 мкм, а переходу $E_5 \rightarrow E_3$ – в красной области видимого спектра с длиной волны 0,6328 мкм.

В гелий-неоновом лазере рабочая газовая смесь находится в газоразрядной трубке, длина которой может достигать 0,2-1 м. Трубка изготавливается из высококачественного стекла или кварца. Мощность генерации существенно зависит от диаметра трубки. Увеличение диаметра ведет к увеличению объема рабочей смеси, что способствует возрастанию мощности генерации (см. рис. 1.8).

Широко распространено питание газовых лазеров постоянным током при напряжении 1000-2000 В, получаемом с помощью стабилизированных выпрямителей. В этом случае газоразрядная трубка снабжается подогреваемым или холодным катодом и анодом. Для зажигания разряда в трубке используется электрод, на который подается импульсное напряжение около 12 кВ. Это напряжение получают путем разряда конденсатора емкостью 1-2 мкФ через первичную обмотку импульсного трансформатора.

Достоинством гелий-неоновых лазеров является когерентность их излучения, малая потребляемая мощность и небольшие габариты. Основные недостатки – невысокий коэффициент полезного действия (0,01-0,1 %) и низкая выходная мощность, не превышающая 60 мВт. Эти лазеры могут работать и в импульсном режиме, если для возбуждения использовать импульсное напряжение большой амплитуды при длительности в единицы микросекунд. Главные области практического применения гелий-неоновых лазеров – научные исследования и измерительная техника.

Из *ионных лазеров* наибольшее распространение получил *аргоновый лазер* непрерывного излучения на длине волны 0,48 мкм. Исторически механизм возбуждения ионного лазера был предложен Е. Гордоном в 1964 г. Инверсия населенностей между верхним ($4p$) и нижним ($4s$) рабочими уровнями создается следующим образом.

Уровень $4p$, имеющий по сравнению с уровнем $4s$ большее время жизни, заселяется ионами аргона за счет их столкновения с быстрыми электронами в газовом разряде и за счет переходов возбужденных ионов из группы расположенных выше уровней $5p$. В то же время уровень $5p$, обладающий очень коротким временем жизни, примерно в 25 раз меньше, чем время жизни уровня $4p$, быстро опустошается за счет возвращения ионов в основное состояние. Так как уровни $5p$; $5s$; $4p$ состоят из групп подуровней, генерация может происходить одновременно на нескольких длинах волн: от 0,45 до 0,53 мкм (рис. 1.5).

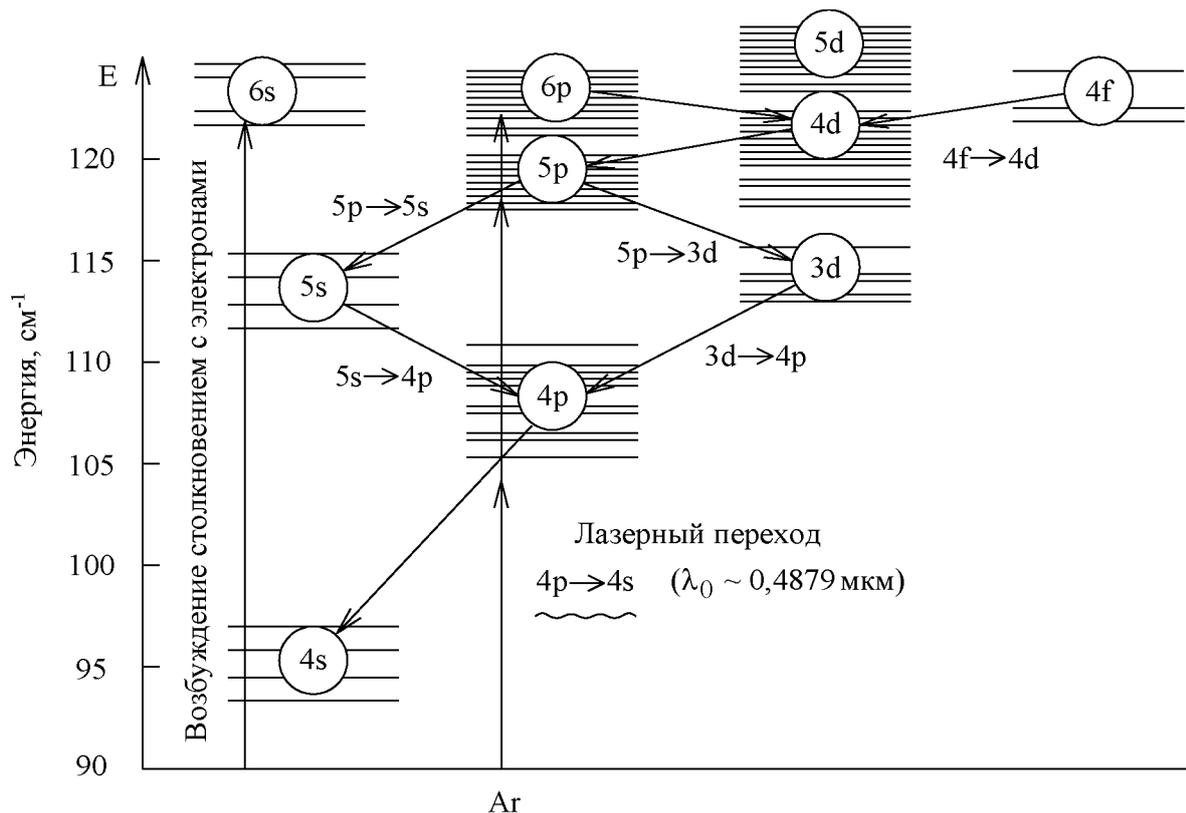


Рисунок 1.5 – Схема уровней и квантовые переходы между уровнями аргона:
 ($4p \rightarrow 4s$ – устойчивый лазерный переход на $\lambda_0 = 0,487$ мкм)

Особенности конструкции аргонового лазера обусловлены тем, что для его работы требуется пропускать через газ ток большой плотности, так как вначале нужно ионизировать нейтральные атомы аргона. Поэтому необходимо предусмотреть эффективную систему теплоотвода от газоразрядной трубки.

В настоящее время ионные аргоновые лазеры являются самыми мощными источниками непрерывного когерентного излучения в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра.

Созданы лазеры с мощностью излучения в 150 Вт. Теоретические оценки показывают, что мощность этих лазеров может быть увеличена до нескольких сотен ватт.

Широкому распространению мощных аргоновых лазеров мешает их высокая стоимость, сложность, малый коэффициент полезного действия (порядка 0,1 %) и большая потребляемая мощность (3-5 кВт).

Основными областями применения аргоновых лазеров являются фотохимия, лазерная технология и медицина. Особенно перспективно использование в медицине коротковолнового ультрафиолетового излучения с длиной волны 0,26 мкм, которое на 90 % поглощается нуклеиновыми кислотами и только на 10 % – белками.

Атомные и ионные лазеры имеют низкий коэффициент полезного

действия в связи с тем, что верхний рабочий уровень расположен очень высоко над основным состоянием, и, следовательно, в процессе возбуждения принимает участие лишь малая доля общего числа электронов. С точки зрения повышения коэффициента полезного действия газоразрядных лазеров желательно, чтобы рабочие уровни были расположены по возможности ниже. В качестве таких уровней целесообразно использовать колебательные уровни молекул CO_2 , H_2O , D_2O , CH_3 , HCN .

Первенство в получении генерации на *молекулах* CO_2 (рис. 1.6, 1.9) принадлежит С.К.Пателу. Почти за два года 1964-65 гг. он получил мощность непрерывного излучения газового лазера сначала 220 Вт, затем 450 Вт и 925 Вт на смеси $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$ с коэффициентом полезного действия $\eta \approx 10\%$. Для того времени это было сенсацией, если сравнить эти результаты с мощностью около 2 мВт у гелий-неонового лазера.

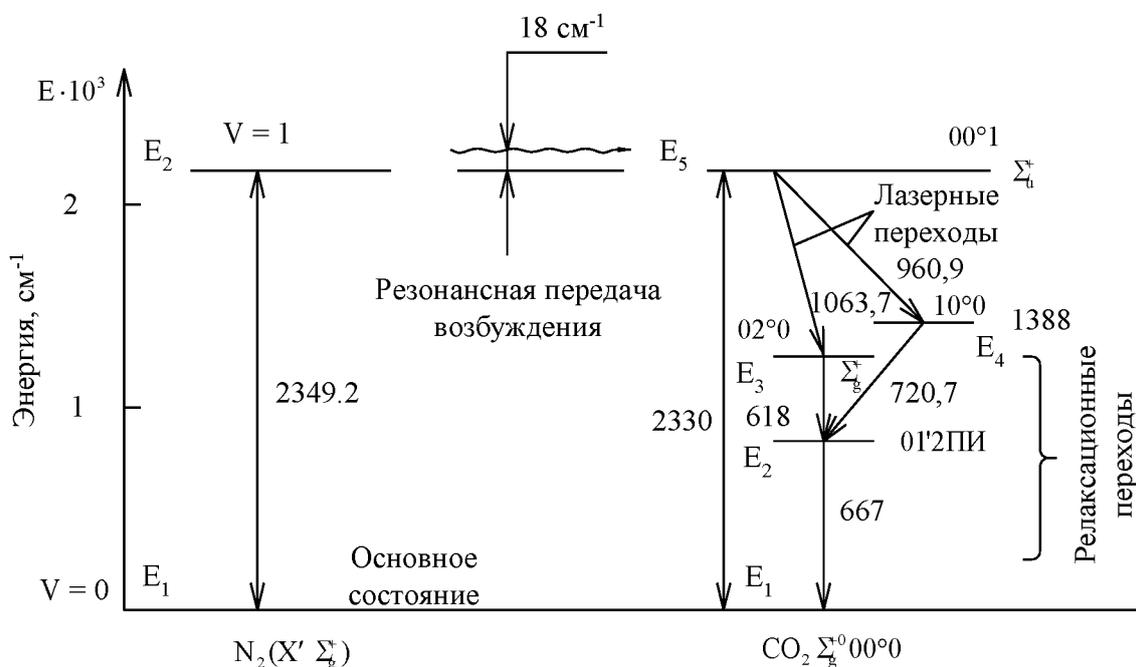


Рисунок 1.6 – Схема нижних колебательных энергетических уровней молекул CO_2 и N_2 и квантовых переходов молекулы CO_2 (индекс ν обозначает колебательные уровни)

Молекула CO_2 имеет три частоты собственных колебаний, которым соответствуют уровни E_3 , E_4 и E_5 . Заселение этих уровней в газовом разряде происходит вследствие трех основных процессов.

Первый из них – возбуждение молекул CO_2 при их соударениях с быстрыми электронами. Использование такого механизма возбуждения позволяет создать лазер, дающий в непрерывном режиме излучение с мощностью около 10 Вт при коэффициенте полезного действия, равном 10%. Значительное повышение мощности и коэффициента полезного дей-

ствия достигается добавлением к CO_2 молекулярного азота и гелия.

В газовом разряде происходит интенсивное возбуждение молекул азота до уровня E_5 углекислого газа. Совпадение энергетических уровней E_2 азота и E_5 CO_2 почти идеальное – около 18 см^{-1} . За счет резонансной передачи возбуждения от молекулы азота к молекуле CO_2 населенность уровня E_5 значительно возрастает. Это второй процесс.

Гелий вводится в рабочую смесь для уменьшения ее температуры, это снижает тепловое заселение всех уровней и увеличивает инверсию населенности.

Третий механизм дополнительного заселения уровня E_5 молекулы CO_2 состоит в осуществлении каскадных переходов на этот уровень молекулы углекислого газа, колебательно-возбужденной за счет столкновений с электронами и перешедшей на более высокие энергетические уровни, не показанные на рис. 1.6. Индуцированное излучение в лазере на CO_2 вызвано переходами $E_5 \rightarrow E_4$ и $E_5 \rightarrow E_3$. Особенностью лазера на CO_2 является большое время жизни верхнего уровня (порядка $2,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$), благодаря чему этот уровень в отсутствии генерации служит накопителем энергии, которая при высокой добротности резонатора освобождается в виде мощного импульса.

Наиболее интенсивным является переход $E_5 \rightarrow E_3$ с длиной волны $10,6 \text{ мкм}$, который может почти полностью подавлять лазерную генерацию в переходе $E_5 \rightarrow E_4$ на длине волны $9,6 \text{ мкм}$. Длина волны $10,6 \text{ мкм}$ соответствует окну прозрачности атмосферы, что открывает возможность применения этого излучения в оптической локации. Каждый из колебательных уровней, показанный на рис. 1.6, упрощен, так как в действительности представляет собой полосу, включающую до 30 подуровней. Поэтому спектр генерации в лазере на CO_2 очень сложен, может возникнуть на большом числе переходов и иметь несколько сотен линий. Длины волны генерируемого излучения лежат в интервале $9,2\text{-}11,4 \text{ мкм}$.

Лазеры на углекислом газе находят широкое применение в нелинейной оптике и в лазерных технологических установках. В технологических целях используются также молекулярные лазеры на азоте, генерация в котором наблюдается при возбуждении молекул в сильноточном высоковольтном разряде. Мощности излучения некоторых отечественных молекулярных лазеров следующие: ОКГ-15, $P_{\text{АУО}} = 10 \text{ Вт}$; ЛГ-22, $P_{\text{АУО}} = 40 \text{ Вт}$; ЛГИ-21, $P_{\text{АУО}} = 10 \text{ кВт}$.

Газовые лазеры, у которых источниками энергии являются колебательно-возбужденные молекулы, а инверсия населенностей создается путем быстрого расширения предварительно нагретой усиливающей газовой смеси, движущейся со сверхзвуковой скоростью через оптический резонатор, называются *газодинамическими* оптическими квантовыми генераторами. Впервые идею их создания и получение генерации в 1968 г. на волне

длиной $\lambda_0 = 10,6$ мкм осуществили А.М. Прохоров и В.К. Конюхов. Активной средой в таких генераторах являются газовые смеси молекул углекислого и угарного газа CO_2 , CO ; азота и окиси азота N_2 , NO_2 ; паров воды H_2O , кислорода O_2 и благородных газов He , Ne , Ar , Kr .

В основном в газодинамических лазерах используют газовую смесь: N_2 (80-90 %) объемных долей; CO_2 (5-10 %) и пары H_2O (1-2 %): молекулярный азот – газ с большим временем колебательной релаксации и колебательное возбуждение N_2 сохраняется даже при высокой температуре 1300-1400 К.

Молекулярный углекислый газ CO_2 является вторым компонентом смеси. Молекула CO_2 имеет разрешенный квантовый переход на длине волны $\lambda_0 = 10,6$ мкм и возбужденный колебательный уровень ее 00^0_1 совпадает с колебательным уровнем молекулы азота. Между ними происходит резонансная передача энергии колебательного возбуждения. Таким образом, энергия колебательного движения молекулы азота является резервом, откуда черпается энергия для лазерного излучения.

Молекула CO_2 имеет малое время колебательной релаксации и населенность ее уровней на пути к оптическому резонатору (рис. 1.7) близка к равновесной.

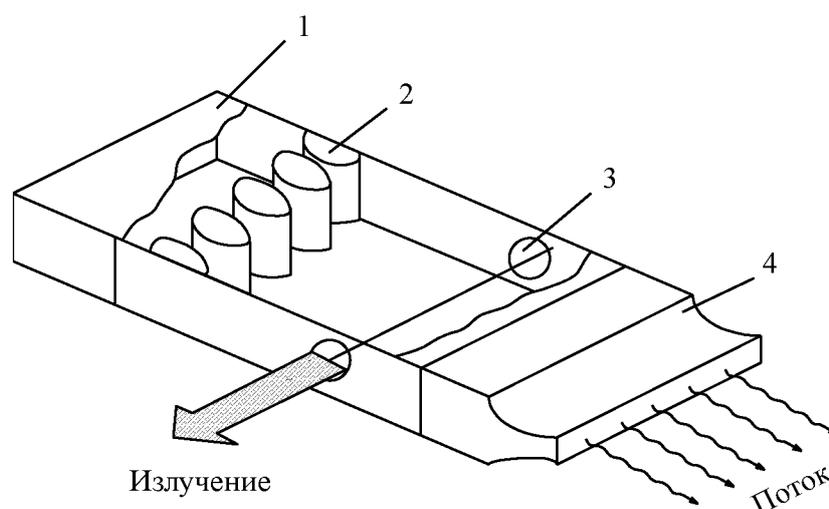


Рисунок 1.7 – Схема конструкции газодинамического лазера:
 1 – камера сгорания; 2 – сверхзвуковые сопла;
 3 – оптический резонатор; 4 – диффузор

Только населенность возбужденного уровня 00^0_1 поддерживается постоянной за счет столкновений с молекулами N_2 . Населенность нижнего уровня молекулы CO_2 10^0_0 ($E = 1388 \text{ см}^{-1}$) при температуре сверхзвукового газового потока 300 К мала и поэтому в проходящем через оптический резонатор газе имеет место инверсия населенностей.

За время, в течение которого газовая смесь проходит резонатор, каж-

дая молекула CO_2 совершает 3-4 цикла: переход из основного состояния на уровень $00^{\circ}1 \rightarrow$ излучательный переход при столкновении с колебательно-возбужденной молекулой N_2 и релаксационный переход на основной уровень $10^{\circ}0$. Пары H_2O сокращают время жизни молекул CO_2 на нижнем энергетическом уровне и ускоряют релаксационный переход в основное состояние. Эту же функцию может выполнить гелий с концентрацией порядка 40-60 % при замещении азота.

Для создания инверсии населенности при быстром расширении газа используется способ пропускания смеси углекислого газа с азотом через *сверхзвуковое сопло Лавала*.

В камеру такого газодинамического лазера (рис. 1.7) подается горючее (C_2N_2 или CO) и окислитель (воздух). В результате горения образуется горячая газовая смесь, состоящая из углекислого газа и паров воды. Для обеспечения необходимых пропорций газовой смеси (примерно 10 % CO_2 и 1 % паров H_2O) и заданной температуры (около 1400 К) в камеру добавляется азот.

Колебательная энергия молекул азота передается в резонансных столкновениях молекулами углекислого газа. Нагретая газовая смесь быстро адиабатически расширяется и через решетку сверхзвуковых сопел поступает в оптический резонатор.

На рис. 1.8 приведена упрощенная конструкция лазерной головки гелий-неонового лазера ЛГ-36а, а на рис. 1.9 показана конструкция головки молекулярного CO_2 лазера ЛГ-23.

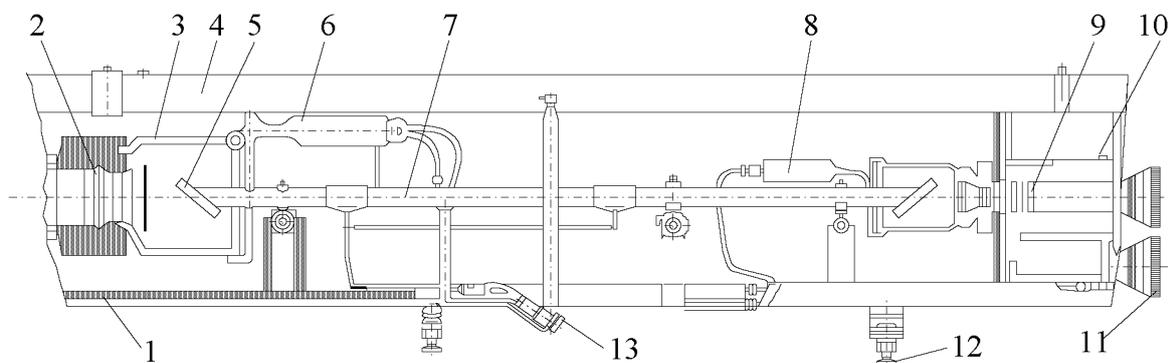


Рисунок 1.8 – Схема конструкции лазерной головки гелий-неонового лазера типа ЛГ – 36а:

- 1 – основание; 2 – выходное сферическое зеркало; 3 – обойма; 4 – кожух;
 5 – выходное окно; 6 – оксидный катод; 7 – газоразрядная трубка (кювета);
 8 – анод; 9 – плоское зеркало; 10 – узел крепления зеркала; 11 – юстировочные винты; 12 – опоры; 13 – разъем

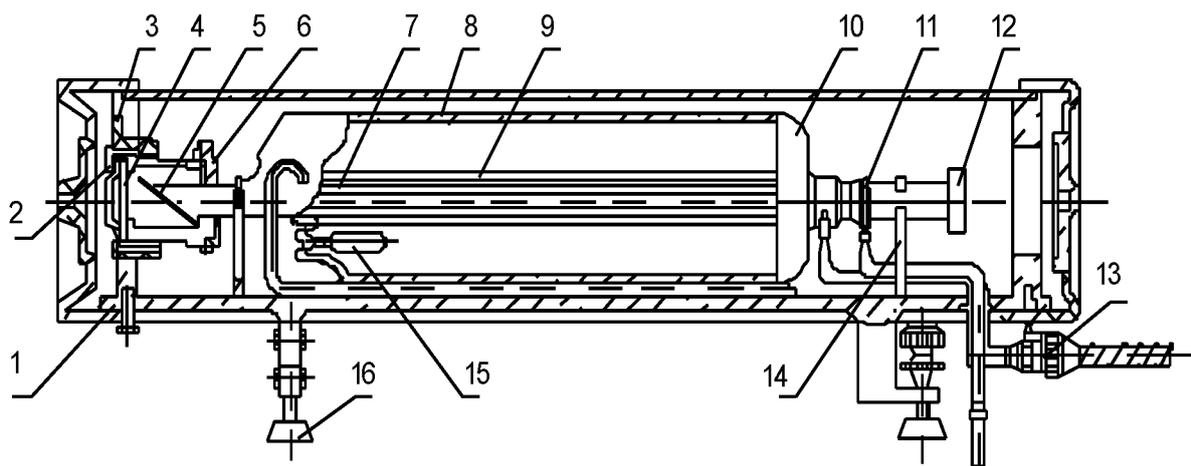


Рисунок 1.9 – Схема конструкции головки молекулярного CO_2 лазера типа ЛГ – 23:

1 – основание; 2 – фиксатор; 3 – юстировочный узел; 4 – выходное зеркало; 5 – выходное окно; 6 – манжета; 7 – стеклянный капилляр кюветы; 8 – резервуар с газом; 9 – рубашка водяного охлаждения; 10 – кювета; 11 – анод; 12 – внутреннее зеркало; 13 – разъем; 14 – стойка; 15 – катод; 16 – опора

Газодинамические лазеры, рабочую смесь в которых образуют продукты сгорания, обеспечивают мощности излучения, превышающие в непрерывном режиме 100 кВт.

Перспективны импульсные газодинамические лазеры с накачкой взрывом. В таких устройствах взрывчатая смесь газов поджигается электрической искрой. При взрыве в камере сгорания образуется горячая смесь углекислого газа, паров воды и азота, имеющая необходимое давление, и рабочая смесь поступает через сопло в резонатор.

В настоящее время ведется разработка импульсных газодинамических лазеров с накачкой от взрыва твердого горючего.

1.3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

В настоящее время создано большое количество полупроводниковых лазеров различных типов; охлаждаемых и неохлаждаемых с различными схемами возбуждения, на различных материалах: ZnS; ZnO; ZnSe; CdS; CdTe; GaSe; GaTe; GaAs; $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$; $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$; GaSb; PbS; PbSe; PbTe; InSb; $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и т.д. Эти лазеры перекрывают значительный диапазон длин волн от ультрафиолета до дальней инфракрасной области: 0,33; 0,37; 0,46; 0,49; 0,53; 0,59; 0,63-0,9; 0,78; 0,83-0,91; 0,9-1,5; 1,01-1,55; 2,1; 3,1; 3,1-5,4; 3-15; 4,3; 5,2; 6,5; 3,9-8,5; 6; 28; 8-31,2 и т.д. Большим их достоинством являются малые габариты и большой коэффициент полезного действия (около 80 %). Полупроводниковые лазеры из-за особенностей энергетической структуры активного вещества существенно отличаются от лазеров других типов.

В полупроводнике, подвергнутом нагреву, облучению или пропуска-

нию тока, электроны валентной зоны, поглощая энергию, сообщаемую извне, приобретают способность преодолевать запрещенную зону и переходить в более высокую энергетическую зону – зону проводимости [1, 3, 6].

В результате этого образуются пары носителей заряда: электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне, что приводит к *электронно-дырочной проводимости*. Возможен, очевидно, и обратный переход электронов из возбужденного атома на более низкий энергетический уровень: из зоны проводимости в валентную зону. В результате такого перехода пары электрон – дырка *рекомбинируют*, то есть при заполнении электронами пустых мест (дырок) в валентной зоне, электрон и дырка исчезают, выделяя избыточную энергию, полученную электронами извне в процессе возбуждения атома. Этот процесс длится примерно 10^{-10} - 10^{-12} с.

В состоянии теплового равновесия число электронов в валентной зоне во много раз больше, чем в зоне проводимости. Поэтому при освещении полупроводника поглощение света преобладает над усилением. Для усиления света необходимо создать особые условия, при которых концентрация электронов вблизи дна зоны проводимости E_C была бы больше их концентрации вблизи потолка валентной зоны E_V , то есть $N_C > N_V$ (рис. 1.10). В этих условиях число актов спонтанной и индуцированной рекомбинации будет преобладать над числом актов поглощения и произойдет усиление света. Условие $N_C > N_V$ выполняется при наступлении в полупроводнике так называемого вырождения, то есть такого состояния, при котором все уровни в нижней части зоны проводимости заняты электронами, или в верхней части валентной зоны – дырками. Наивысший уровень энергии μ' , до которого электроны плотно заполняют зону проводимости, называется уровнем Ферми для электронов.

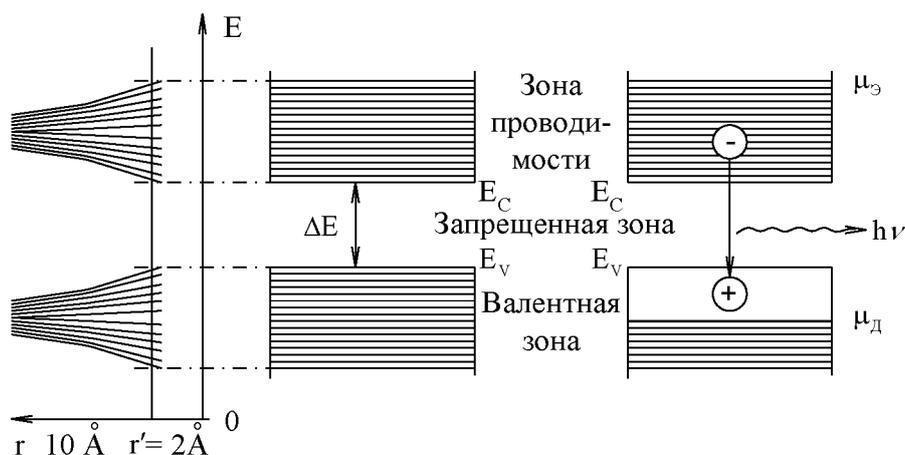


Рисунок 1.10 – Энергетический спектр полупроводникового кристалла

Если в полупроводнике одновременно вырождены электроны и дыр-

ки, то расстояние между уровнями Ферми для электронов $\mu_{\dot{A}}$ и для дырок $\mu_{\dot{D}}$ больше, чем ширина запрещенной зоны, то есть:

$$\mu_{\dot{A}} - \mu_{\dot{D}} > \Delta E. \quad (1.6)$$

Это энергетическое состояние, необходимое для работы полупроводникового лазера, принято называть *инверсией населенностей уровней*.

Электроны из зоны проводимости могут перейти в валентную зону только на свободные уровни, лежащие в интервале от $E_{\dot{V}}$ до $\mu_{\dot{A}}$, так как остальные уровни уже заняты электронами. Электроны из валентной зоны по той же причине практически могут перейти в зоны проводимости только на уровни, лежащие выше уровня Ферми для электронов $\mu_{\dot{A}}$. Таким образом, если оказать на вырожденный полупроводник дополнительное воздействие, энергия которого лежит в интервале $(E_C - E_{\dot{V}}) \leq E \leq (\mu_{\dot{A}} - \mu_{\dot{D}})$, то такой полупроводник будет генерировать кванты излучения (фотоны).

Для получения инверсии в чистом полупроводнике необходимо достичь вырождения электронов и дырок и выполнения условия $\mu_{\dot{A}} - \mu_{\dot{D}} > \Delta E$. Чем выше температура кристалла, тем труднее это осуществить, так как с повышением температуры электроны и дырки стремятся на более высокие энергетические уровни, плотность заполнения нижних состояний уменьшается, уровни Ферми приближаются к запрещенной зоне. Поэтому все полупроводниковые лазеры легче возбуждать при низких температурах.

Лазеры с прямыми переходами отличаются друг от друга лишь способами создания инверсии населенностей, то есть способами реализации условия (1.6).

Классифицируя по этому признаку, их можно разбить на четыре основные группы: лазеры на *p-n* переходе (инжекционные лазеры); лазеры с электронным возбуждением; лазеры с оптической накачкой и, наконец, лазеры с прямым электрическим возбуждением (лавинный пробой).

В чистых беспримесных полупроводниковых материалах получить одновременное вырождение электронов и дырок практически невозможно. Если ввести в кристалл определенные примеси, легко отдающие электроны – *доноры*, которые создают уровни в запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости E_C , то можно создать полупроводники *n*-типа. Так же можно создать полупроводники *p*-типа, атомы которых легко принимают электроны – *акцепторы*, образующие энергетические уровни вблизи верхнего края валентной зоны $E_{\dot{V}}$. В примесных полупроводниках *p*-типа и *n*-типа увеличением степени легирования довольно просто получить вырождение электронов либо дырок. Место соединения полупроводников *p*- и *n*-типа является электронно-дырочным *p-n* переходом, который характеризуется

потенциальным барьером. В условиях равновесия уровни Ферми в p и n областях p - n перехода совпадают. Электроны и дырки будут рекомбинировать, излучая фотоны только в первый момент соединения, и через малое время (10^{-8} с) процесс излучения прекратится, так как носители заряда перераспределятся и перейдут в новое равновесное состояние и уровни Ферми в p и n областях будут совмещены.

Все может качественно измениться, если к p - n переходу приложить внешнее напряжение U_0 , которое снизит потенциальный барьер и приведет к инжекции, то есть впрыскиванию электронов из n -области и дырок из p -области в область электронно-дырочного перехода (рис. 1.11).

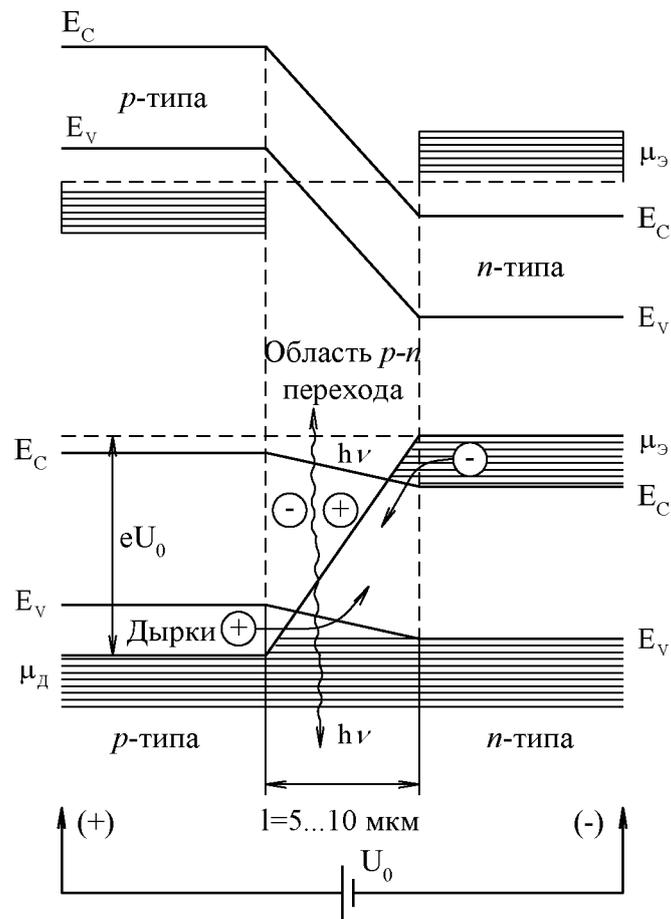


Рисунок 1.11 – Энергетическая схема p - n перехода вырожденного полупроводника GaAs до и после включения источника напряжения U_0 в прямом направлении

При этом уровень Ферми для электронов μ_e в области p - n перехода окажется выше дна зоны проводимости E_C , а уровень Ферми для дырок в этой же области полупроводника окажется ниже потолка валентной зоны E_V . Следовательно, получим одновременно в одной и той же области p - n перехода вырождение электронов и дырок, то есть, выполним условие ин-

версии населенностей $\mu \dot{\gamma} - \mu \dot{A} > \Delta E$.

Условие инверсии в p - n переходе выполняется с тем большим запасом, чем выше электрическое поле в переходе, то есть чем больший ток протекает через этот переход.

Критическая плотность мощности излучения $2 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^6$ Вт/см². При температуре кристалла 300 К выходная мощность равна около 600 Вт; частота генерации около 1 кГц, длительность импульса около 100-200 нс. Вообще частота генерации индуцированного излучения может быть увеличена до 100 кГц.

Для увеличения выходной энергии лазерные диоды конструктивно оформляют в виде матрицы. Типичные характеристики ее при $T = 300$ К следующие: импульсная мощность $P_{\dot{A}\dot{\gamma}\dot{\delta}}$ порядка 0,5-1,0 кВт, расходимость излучения γ составляет 4-6° в плоскости p - n перехода и 10-20° в перпендикулярной плоскости. Длина волны λ примерно 0,84-0,89 мкм. Градиент длины волны $d\lambda/dT$ составляет 1,2-1,5 Å/градус.

Итак, чтобы получить полупроводниковый инжекционный лазер, необходимо:

- 1) путем последовательного легирования вырастить кристалл с p - n переходом;
- 2) снизить потенциальный барьер путем инъекции носителей заряда, то есть получить инверсию населенностей $\mu \dot{\gamma} - \mu \dot{A} > \Delta E$;
- 3) разработать конструкцию и технологию полупроводникового лазера;
- 4) обеспечить положительную обратную связь, создав резонатор из полированных граней кристалла;
- 5) выбрать схему и спроектировать систему накачки.

Существенными недостатками гомоструктурных инжекционных лазеров являются большие плотности порогового тока $10^4 - 10^5$ А/см² и сравнительно малый коэффициент полезного действия 1-3 %. Потенциальные возможности полупроводниковых лазеров в данном случае далеко не исчерпываются. Причины этого кроются в том, что часть тока инъекции носителей в гомоструктурах растекается в прилегающих к p - n переходу областях, где коэффициент поглощения выше, чем в области перехода. Значительная часть электронов проскакивает сквозь p - n переход и не участвует в рекомбинации. Практически энергия фотонов излучения получается меньше вследствие взаимодействия носителей друг с другом, с кристаллической решеткой и примесями, с *экситонами* (элементарными электрически нейтральными возбуждениями в полупроводниках и диэлектриках, связанными с образованием пары электрон-дырка) и т.д. Только малая часть носителей непосредственно участвует в создании индуцированного излучения. Увеличение коэффициента полезного действия полупроводникового лазера достигается использованием *гетеропереходов*.

Для улучшения характеристик инжекционных лазеров применяются

гетероструктуры, в которых используются несколько гетеропереходов и *p-n* переходов. Так, основной эффект гетеропереходов, состоящий в резком снижении порога генерации при комнатной температуре, достигнут с помощью так называемой двухсторонней гетероструктуры типа *n* (Al, Ga) As – pGaAs – p(Al, Ga) As. Плотность порогового тока при комнатной температуре для этой системы не превышает 10^3 А/см². Благодаря этому удалось впервые получить непрерывную генерацию в инжекционных лазерах при комнатной температуре.

Успешно применяется в полупроводниковых лазерах и другая аналогичная гетероструктура (In, Ga) (As, P). Например, в твердом растворе Ga_xIn_{1-x}P_{1-y}As_y индексы *x* и *y* подобраны таким образом, что влияние Ga и As на период решетки взаимно скомпенсировано.

Рассмотрим понятие «**гетеролазер**». К гетероструктурным лазерам относятся полупроводниковые лазеры, в которых используются оптические переходы с участием свободных носителей в многослойных сложных кристаллических структурах с оптическим ограничением света и электронным ограничением диффузионного растекания инжектируемых носителей тока.

На рис. 1.12,*a* показан пример энергетических зон гетеролазера с двойным гетеропереходом, созданным из двух веществ: арсенида галлия и GaAlAs (арсенида галлия с примесью алюминия). Такие два вещества имеют различные показатели преломления и ширину запрещенной зоны, что эффективно ограничивает инжекцию возбуждения и излучения света областью перехода. Другими словами, скачок показателя преломления обеспечивает отражение генерируемого света опять в область перехода. А разница в размерах запрещенной зоны ΔE удерживает носители в этой области.

В данном случае двойная гетероструктура (ДГС) состоит из трех компонентов: полупроводник *p*-типа из GaAs находится между компонентами *p*⁺ и *n*-типа из Al_xGa_{1-x}As. Эту двойную гетероструктуру помещают на подложке из GaAs с электронной проводимостью, сверху на электрическом контакте устанавливают шайбу из GaAs с дырочной проводимостью. Этот (*n – p*) гетеропереход мешает дыркам перемещаться в область *n*-типа, что не позволяет также электронам инжектировать в область перехода. В (*p – p*⁺) гетеропереходе из-за увеличения ширины запрещенной зоны ΔE создается потенциальный барьер, который отражает инжектируемые электроны и ограничивает рекомбинационное излучение областью перехода. Пороговая плотность тока *j* в такой гетероструктуре уменьшается до $2 \cdot 10^3$ А/см², что приблизительно в 20 раз меньше, чем в гомолазерах. При температуре 300 К такие гетеролазеры имеют мощность около 5-7 мВт на длине волны $\lambda = 0,82$ мкм с пороговым током возбуждения до 300 мА.

К достоинствам полупроводниковых инжекционных гетеролазеров можно отнести: малые размеры, прямое превращение энергии электрического тока в когерентное излучение, возможность генерации непрерывного и импульсного индуцированного излучения, высокий коэффициент полез-

полупроводник потоком электронов высокой энергии (десятки и сотни килоэлектронвольт). Электроны, проникая в глубь кристалла на сотни микрометров, ионизируют на своем пути атомы решетки. Возбуждаемые при этом электроны валентной зоны переходят в основном на высокие уровни зоны проводимости, так что их энергия существенно превосходит энергию запрещенной зоны ΔE . Эти электроны, в свою очередь, ионизируют атомы решетки – возникает лавина, ослабевающая при удалении от бомбардируемой поверхности в глубь полупроводника.

При таком механизме возбуждения свободных носителей значительная часть энергии расходуется на электрон-фотонные взаимодействия, вызывая разогрев кристалла. Оценки показывают, что энергия, в среднем расходуемая на создание одного возбужденного электрона, близка к $3 \Delta E$. Это в конечном счете предопределяет теоретически предельное значение коэффициента преобразования энергии электронного луча в лазерное излучение, близкое к 30-40 %.

Конструктивно полупроводниковый лазер с электронным возбуждением выполняется в виде электронно-лучевой трубки (рабочее напряжение несколько десятков киловольт), в которую в качестве экрана-мишени помещается полупроводник. По характеру взаимной ориентации направления электронного луча и оси оптического резонатора различают полупроводниковые лазеры с поперечной и продольной накачкой (рис. 1.13). Лазерный эффект при бомбардировке быстрыми электронами наблюдается в очень многих полупроводниках: технически реализованы лазеры зеленого цвета свечения (CdS , $\lambda \approx 0,51$ мкм), получен интенсивный красный свет (CdSe , $\lambda \approx 0,67$ мкм) и голубой (ZnSe , $\lambda = 0,46$ мкм). В ближней инфракрасной области спектра перспективны материалы GaAs и CdTe .

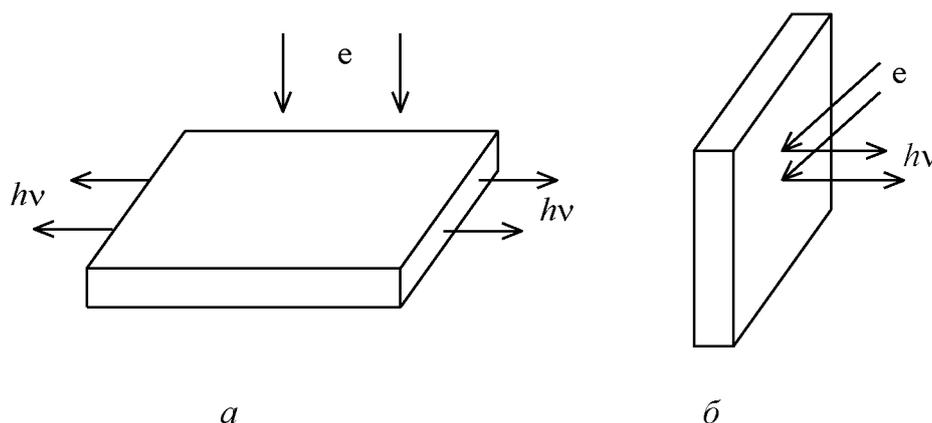


Рисунок 1.13 – Облучение полупроводникового кристалла в лазере с электронным возбуждением с поперечной (а) и продольной (б) накачкой

По сравнению с инжекционной накачкой использование возбуждения электронным лучом имеет следующие основные достоинства:

– высокие мощности излучения (непрерывные и особенно импульсные), обусловленные тем, что благодаря глубокому проникновению быстрых электронов возбуждается значительная толща кристалла (в 10^2 - 10^3 раз больше, чем, например, в ДГС-лазере);

– возможность использования более широкого ряда полупроводниковых материалов, в том числе соединений типа $A^{II}B^{VI}$, обусловленная тем, что в этом виде полупроводникового лазера нет необходимости в *p-n* переходе;

– использование таких достоинств электронного луча («переходящих» на лазерный луч), как простота двухкоординатного сканирования и высокоскоростная (до 10^{-11} с) модуляция;

– возможность управляемой перестройки длины волны излучения, многоцветность, базирующаяся на использовании в качестве мишени варизонного полупроводника (полупроводника, у которого вследствие плавного изменения состава ширина запрещенной зоны неодинакова по площади кристалла).

Высокая эффективность использования энергии электронного луча и особенно низкая угловая расходимость лазерного излучения (единицы градусов) выгодно отличают такие полупроводниковые лазеры от источников спонтанного излучения.

При создании систем проекционного широкоформатного цветного телевидения (с площадью экрана порядка 10 м^2) – основной области применения полупроводниковых лазеров с электронным возбуждением – удастся получить в десятки раз большую яркость, чем на электронно-лучевых трубках с катодолуминофорными мишенями.

Недостатки лазеров с электронным возбуждением следующие: необходимость вакуумируемого объема, значительные габариты, невысокая эффективность (из-за двойного преобразования энергии общий коэффициент полезного действия не превышает 1 %), сложность и громоздкость систем питания (их объем и масса в десятки раз превышают объем лазерной трубки).

Указанные недостатки лазеров с электронным возбуждением не позволяют им встать в один ряд с инжекционными полупроводниковыми лазерами.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Нарисуйте и поясните модель твердотельного импульсного лазера.
2. Назовите условия, необходимые для получения индуцированного излучения.
3. Для чего предназначены активное вещество, резонатор и система накачки в лазере?
4. Какие материалы используются в виде активного вещества твер-

дотельных лазеров?

5. Поясните принцип действия лазера на твердом теле.
6. Поясните трехуровневую систему накачки активного вещества в твердотельном лазере.
7. Поясните четырехуровневую систему накачки активного вещества в твердотельном лазере.
8. Чем объясняется малый коэффициент полезного действия твердотельных лазеров?
9. Какие материалы используются в лазерах с четырехуровневой системой накачки?
10. Назовите основные типы газовых лазеров.
11. От чего зависит длина волны излучения газовых лазеров?
12. Поясните принцип действия лазера на нейтральных атомах гелий-неоновой смеси.
13. В чем смысл резонансной передачи энергии в газовых лазерах во время возбуждения активного вещества?
14. Поясните принцип действия ионного аргонового лазера.
15. Поясните конструктивные особенности ионного аргонового лазера.
16. Поясните принцип действия молекулярного CO₂ лазера.
17. Поясните причины большого коэффициента полезного действия CO₂ лазера.
18. Поясните принцип действия газодинамического лазера.
19. Поясните основные процессы в полупроводниковом активном веществе лазера.
20. Каким образом увеличивают выходную мощность излучения полупроводникового инжекционного лазера?
21. Объясните особенности гетеропереходов в полупроводниках.
22. Что такое многослойные структуры на основе твердых растворов в реализации гетероструктурных полупроводниковых лазеров?
23. За счет чего лазеры на гетеропереходах могут работать при комнатных температурах?
24. Что определяет термин «сверхинжекция» в полупроводниковых гетероструктурах?
25. Назовите преимущества лазеров на гетеропереходах.
26. Какие материалы используются при изготовлении лазеров на гетеропереходах?
27. Назовите области применения в современной технике полупроводниковых лазеров на гетеропереходах.
28. Объясните особенности работы полупроводниковых лазеров с электронным возбуждением.
29. В чем отличие электронного возбуждения с поперечной и продольной накачкой?
30. В чем недостатки лазеров с электронным возбуждением?
31. Назовите области применения лазеров с электронным возбуждением.

32. Пленки каких материалов используют в пленочных лазерах?

2. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ В НАУКЕ

2.1. ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ СКОРОСТИ

Одной из важных проблем газовой динамики является определение поля скоростей при обтекании моделей различных тел турбулентным потоком газа, а также получение визуальной картины процесса обтекания. Эта проблема решается различными способами. Например, скорость потока газовой среды определяется с помощью манометров с насадками, регистрирующими величину давления, и термоанемометров, а визуализация осуществляется теневым методом. Как правило, в поток, обтекающий модель, вводится нагреваемая электрическим током проволока, и по степени ее охлаждения определяется скорость газа в данной точке. Недостаток этих методов заключается в конечных размерах датчиков, возмущающих анализируемый объем потока, что отрицательно сказывается на точности измерения и качестве визуальной картины.

С развитием лазерной техники появилась возможность создания устройств для измерения вектора скорости движущейся среды, использующих доплеровский эффект сдвига частоты, образуемого при рассеянии пучков излучения лазера движущимися частицами среды [1, 5].

Этот принцип положен в основу работы *лазерных доплеровских измерителей скорости* (ЛДИС) – перспективных устройств, обладающих рядом преимуществ по сравнению с традиционными измерителями. К ним относят: отсутствие искажения потока в точке измерения, поскольку метод неконтактный; весьма широкий динамический диапазон измеряемых скоростей (10^{-6} - 10^6 м/с); хорошее пространственное разрешение (10^{-10} см³); непосредственное измерение скорости, не требующее последующей математической обработки информации.

К существенным ограничениям принципа измерения следует отнести то, что исследуемая среда должна быть оптически прозрачной и содержать рассеивающие свет частицы оптимальных размеров и с оптимальными оптическими свойствами.

Широкие возможности лазерных измерителей скорости особенно ярко проявляются при исследовании газовых и жидкостных потоков с малыми поперечными размерами, когда известные методы с применением трубок избыточного давления или термоанемометров неприменимы.

Доплеровский лазерный метод позволяет измерять скорости турбулентных потоков газа и жидкости, воздушных потоков, содержащих капли воды и твердые частицы (двухфазные потоки), гиперзвуковых потоков и скорости движущихся светорассеивающих поверхностей.

При использовании оптических устройств в исследованиях пространства около модели требуется предусматривать дополнительные меры, направленные на уменьшение или полное устранение влияния вибрации. Таким образом, при построении ЛДИС следует учитывать указанные ограничения, выбирая оптимальные соотношения параметров схемы и среды, а также вибрационные условия работы прибора.

Эффект Доплера, используемый в этих устройствах, заключается в изменении длины волны (частоты), которое наблюдается при движении источника излучения относительно приемника. Этот эффект характерен для любого волнового процесса распространения света, радиоволн, звука и имеет следующее объяснение. Если источник колебаний с периодом T_0 неподвижен относительно приемника, то длина волны, воспринимаемая приемником, равна произведению скорости света c на период колебаний T_0 . Если же источник, например, приближается к наблюдателю (или наблюдатель к источнику) со скоростью v , то длина волны изменится:

$$\lambda = (c - v) T_0 = \lambda_0 (1 - v/c). \quad (2.1)$$

Наблюдатель зарегистрирует длину волны $\lambda < \lambda_0$, причем относительное изменение длин волн равно:

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}. \quad (2.2)$$

Все многообразие различных схем лазерных доплеровских измерителей скорости можно разделить на два типа: схемы с опорным лучом и дифференциальные схемы.

Первая установка ЛДИС *по схеме с опорным лучом* была разработана в середине 60-х годов (рис. 2.1).

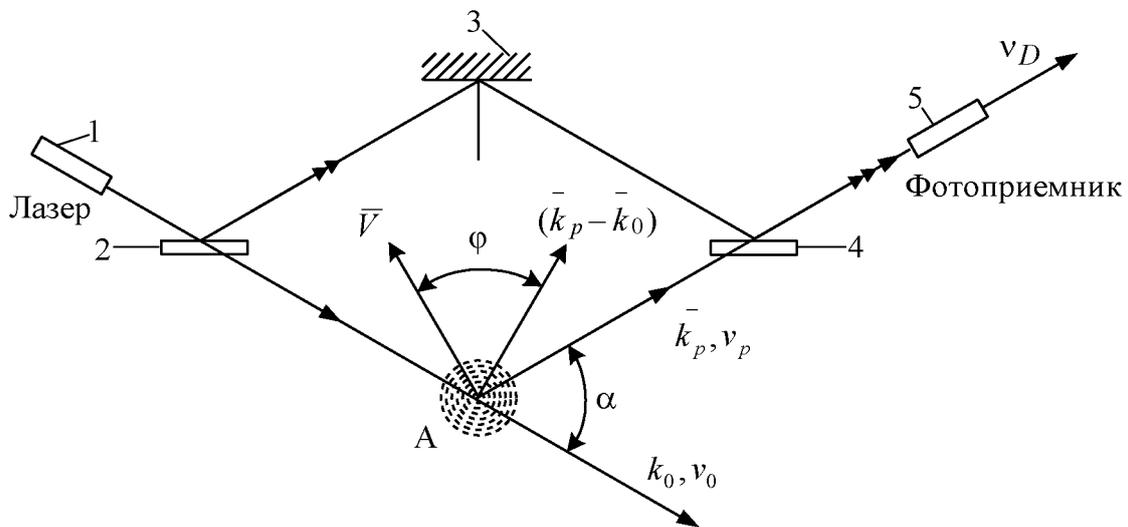


Рисунок 2.1 – Схема ЛДИС с опорным лучом

Работает такая схема следующим образом. Луч газового лазера 1 с частотой излучения ν_0 и волновым вектором $\overline{k}_0 = 2\pi/\lambda_0$ падает на частицы среды в точке А, которые движутся в анализируемом пространстве со скоростью \overline{v} и рассеивают свет. Рассеянные лучи с частотой ν_p и волновым вектором $\overline{k}_p = 2\pi/\lambda_p$ собираются на фотокатоде приемника. Часть начального пучка лазера отклоняется полупрозрачным зеркалом 2, отражается зеркалом 3, затем попадает на полупрозрачное зеркало 4 и совмещается с рассеянным излучением. Если на чувствительном слое фотокатода 5 волновые фронты обоих пучков совпадают, то выходной ток фотоприемника будет содержать компоненту разностной частоты:

$$\nu_D = \nu_p - \nu_0. \quad (2.3)$$

Таким образом, получается полезный сигнал доплеровской частоты. Определим, как изменится частота при рассеянии излучения на частице, перемещающейся со скоростью v в потоке оптически прозрачной среды.

Фронт волны опорного луча от неподвижного источника с частотой ω_0 при попадании на частицу рассеивается, причем рассеянное излучение имеет частоту:

$$\omega_p = \omega_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right). \quad (2.4)$$

Частица, изменяя фронт волны, становится как бы движущимся в пространстве источником вторичного рассеянного излучения, и неподвижный фотоприемник уже будет воспринимать сигнал рассеянного частицей излучения с доплеровской частотой:

$$\omega_D = (\omega_p - \omega_0) = -\omega \frac{v}{c}. \quad (2.5)$$

Полагая $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi c}{\lambda} = kc$, получим:

$$\omega_D = (\omega_p - \omega_0) = -kv = (k_p - k_0)c. \quad (2.6)$$

Из векторного треугольника, образованного волновыми векторами \overline{k}_p , \overline{k}_0 и \overline{k} , следует $\overline{k} = (\overline{k}_p - \overline{k}_0)$ или, учитывая тот факт, что биссектриса угла

α между векторами \overline{k}_P и \overline{k}_0 почти перпендикулярна вектору разности \overline{k} , что

$$\overline{k} \cong 2k_0 \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (2.7)$$

Так как скалярное произведение векторов $(\overline{K} \cdot \overline{V})$ равно

$$(\overline{K} \cdot \overline{V}) = \overline{K} \cdot \overline{V} \cos \varphi = 2k_0 v \sin \frac{\alpha}{2} \cos \varphi, \quad (2.8)$$

то, учитывая показатель преломления среды n , находим частоту доплеровского сигнала:

$$v_D = \frac{2n}{\lambda_0} v \sin \frac{\alpha}{2} \cos \varphi, \quad (2.9)$$

где φ – угол между векторами \overline{v} и \overline{K} .

Отсюда, чем больше площадь фотокатода приемника, тем в меньшем телесном угле захватывается излучение, что накладывает ограничения на прием сигнала, несущего информацию о скорости. Это условие требует совмещения на фотокатоде волновых фронтов с точностью до долей длины волны, поэтому такая схема критична к настройке.

В действительности, имеют место неравные значения мощности опорной и рассеянной волны. Требуются определенные оптимальные соотношения мощности этих излучений, т.е. необходимо вводить дополнительные оптические элементы для ослабления энергии опорной волны.

Анализ существующих схем ЛДИС показал, что для получения информации о векторе скорости частиц воздушного потока, обтекающего модель сложной конфигурации в аэродинамической трубе, в связи со спецификой работы такой трубы целесообразно использовать *дифференциальную схему* с рассеянием назад (рис. 2.2).

В этой схеме луч газового лазера 1 типа ЛГ–106М с помощью набора призм 4, 5, 14 делится на два параллельных луча, которые, пройдя через диафрагму 6, фокусируются объективом 7 в анализируемом объеме потока оптически прозрачной среды вблизи модели 8. Сигнал, несущий информацию о скорости потока, определяется гетеродинированием излучений, возбужденных общим рассеивающим центром и образованными двумя наложенными рассеянными излучениями примерно одинаковой интенсивности. В области пересечения двух излучений образуется интерференционная картина с чередованием максимумов и минимумов интен-

Поскольку оба рассеянных излучения порождаются общим источником рассеяния, они почти совмещены по длине направления. Поэтому возбуждаемый ими ток фотоприемника имеет доплеровскую частоту:

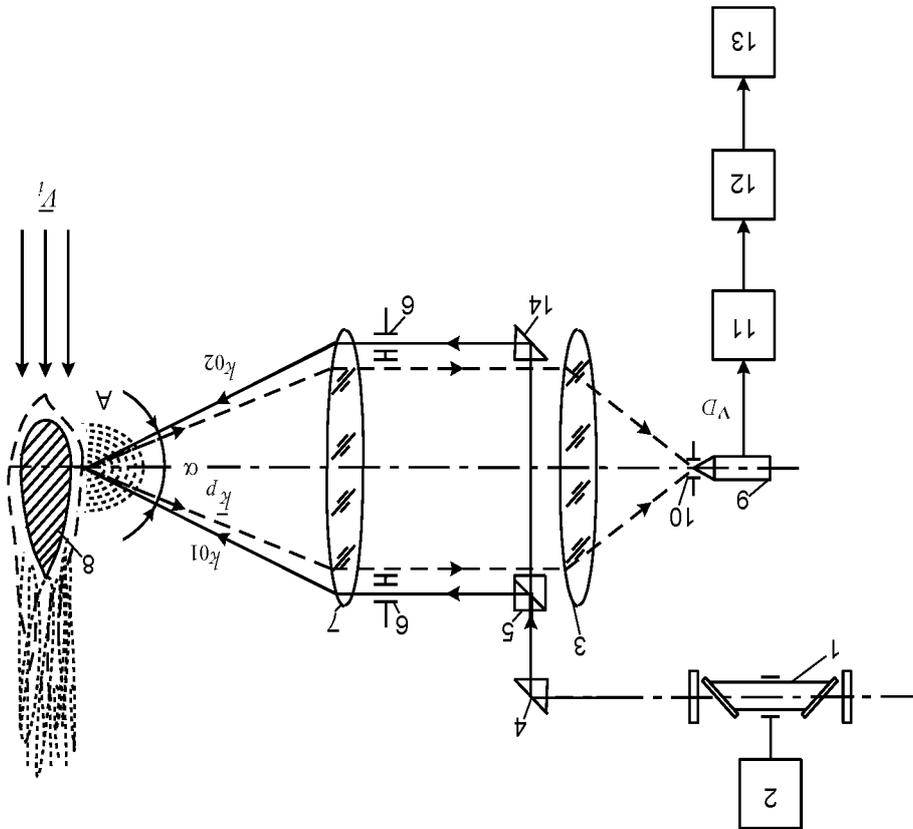
$$k_p : vD2 = v(k_p - k_{02})/2\pi. \quad (2.11)$$

а от k_{02} в том же направлении величины:

$$vD1 = v(k_p - k_{01})/2\pi, \quad (2.10)$$

описываемой вектором k_{01} в направлении k_p , будет иметь величину: Это так называемое соотношение Брэгга. Изображение интерференционной картины далее фокусируется объективами 7 и 3 на фотоприемнике 9 в направлении k_p . Доплеровский сдвиг частоты от облучаемой волны света,

Рисунок 2.2 – Дифференциальная схема ЛДИС с рассеянием назад



$$\text{связности через период } \Lambda = \frac{\lambda_0}{2n \sin \alpha/2}.$$

$$v_D = \frac{\bar{v}}{\Lambda} = \frac{2n}{\lambda_0} v \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (2.12)$$

Окончательно при $n = 1$ имеем:

$$\bar{v} = v \bar{e}_v = \frac{v_D \lambda_0 \bar{e}_v}{2 \sin \alpha / 2}, \quad (2.13)$$

где α – угол между волновыми векторами \bar{k}_{01} и \bar{k}_{02} ; \bar{e}_v – единичный вектор скорости.

Величина доплеровского сдвига частот не зависит от направления наблюдения \bar{k}_P , так как при его изменении каждая отдельная частота v_{D1} и v_{D2} увеличивается или уменьшается на одинаковую величину и разностная частота $v_D = v_{D1} - v_{D2}$ остается постоянной.

Поэтому рассмотренная схема с рассеянием назад наиболее пригодна для проведения измерений скорости потока. Испытания ЛДИС, собранного по дифференциальной схеме с использованием рассеянного назад излучения, выявили некоторые особенности юстировки длиннофокусного оптического блока.

Оказалось, что при жестком креплении разделительных призм наблюдается пространственное смещение осей призм относительно друг друга и главной оптической оси; резко ухудшается качество изображения; имеет место размыв изображения в фокальной плоскости объектива; появляются блики, отраженные от элементов конструкции; уменьшается интенсивность рассеянного света.

Указанные особенности определили следующие требования к конструкции оптического блока ЛДИС: диапазон юстировочных подвижек разделительных призм должен обеспечивать оптимальное качество фокусировки объектива; необходима раздельная юстировка каждой призмы; должны быть приняты конструктивные меры, устраняющие блики рассеянного света и обеспечивающие совместную сборку и центровку нескольких оптических элементов в едином корпусе прибора.

2.2. ЛАЗЕРНЫЕ ДАЛЬНОМЕРЫ

Среди многочисленных областей применения оптических квантовых генераторов перспективным является создание лазерных систем измерения дальности и угловых координат различных движущихся объектов (лидаров) [1, 5].

С развитием новых, высокоинтенсивных источников излучения, в частности, импульсных твердотельных лазеров, лазерные дальномеры получили широкое распространение. Они используются в борто-

вых системах управления летательными аппаратами, в метеорологии и геодезии, применяются для картографирования Луны и т.д.

Узкая направленность и высокая монохроматичность лазерного излучения позволяет создавать спектральную и пространственную плотность энергии, сравнимую с аналогичной характеристикой радиолокаторов СВЧ диапазона длин волн.

Системы лазерной локации обладают преимуществом по сравнению с радиолокаторами: большей точностью измерения доплеровского сдвига частот, лучшим разрешением, большей точностью определения координат наблюдаемого объекта. Лазерные дальнометры имеют функциональную схему, аналогичную схеме радиолокатора. Отличие состоит в основном в электронных схемах приема и обработки оптического сигнала и характеристиках излучателя и антенн (рис. 2.3).

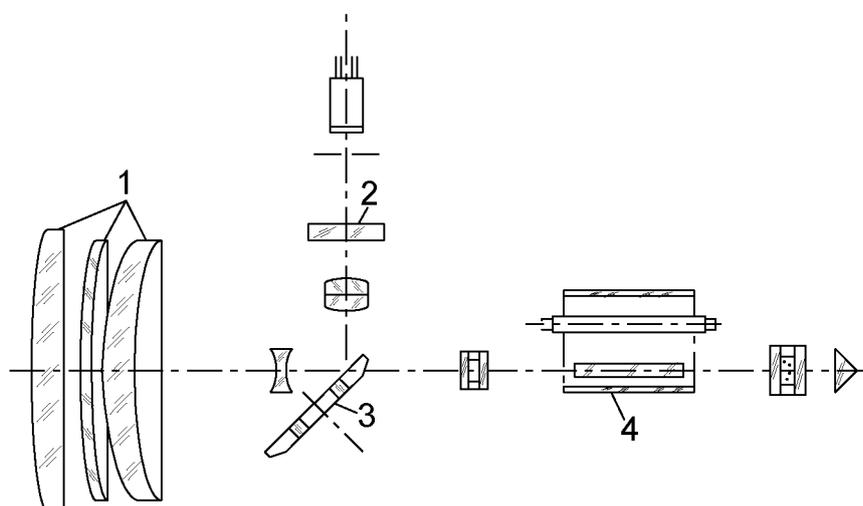


Рисунок 2.3 – Типовая оптическая схема лазерного дальнометра:
1 – объектив приемопередатчика; 2 – объектив фотоприемника;
3 – коммутатор; 4 – лазер-излучатель

Уместно отметить, что задолго до появления радиолокаторов и лазеров в 1936 г., акад. А. А. Лебедевым (1893–1969), основоположником оптической локации и светодальнометрии, был предложен и практически реализован метод измерения дальности с регистрацией импульсов света, отраженных от объекта.

Существует несколько основных методов измерения дальности до неподвижных и подвижных объектов. **Первый** из них – импульсный метод. Он основан на измерении промежутка времени, необходимого для прохождения импульса излучения до объекта и обратно по количеству калиброванных импульсов n_{ϱ} :

$$\tau_{\zeta f} = n_{\varrho} \cdot T = 2 \cdot D/c, \quad (2.14)$$

где T – период калиброванного импульса; D – расстояние до объекта,
 c – скорость света.

Погрешность измерения дальности в этом случае приблизительно можно оценить погрешностью измерения времени $\Delta\tau_{\zeta f}$

$$\Delta D = \left(D \frac{\Delta c}{c} + \frac{1}{2} c \Delta\tau \right) \approx \frac{1}{2} c \Delta\tau_{\zeta f} . \quad (2.15)$$

Второй метод – внутрибазового измерения дальности – основан на определении угла ψ между направлениями зондирующего и отраженного излучения при наличии жесткой базы B :

$$D = B \cdot \operatorname{ctg} \psi \approx B \cdot \psi . \quad (2.16)$$

Интерференционный метод измерения дальности является **третьим** методом. Он основан на создании интерференционной схемы, в которой измеряемое расстояние определяется разностью хода двух смешиваемых лучей:

$$D = \frac{N \lambda_0}{2 n_a} , \quad (2.17)$$

где N – порядок интерференции;
 n_a – показатель преломления атмосферы.

Последние два метода в настоящее время применяются сравнительно редко из-за флуктуации излучения, распространяющегося в атмосфере.

Наконец, **четвертым** является фазовый метод измерения дальности, основанный на регистрации запаздывания фазы модулированного сигнала при двойном прохождении измеряемого расстояния:

$$D = \frac{c}{2 f_M} (M + \varphi / 2\pi) , \quad (2.18)$$

где f_M – частота модуляции;
 M – целое число полных фазовых циклов.

Дальность до объекта в данном случае является функцией разности фаз и частоты модуляции излучения, где M – целое число полных фазовых циклов в общем сдвиге фаз φ (либо целое число длин волн $\lambda_0 = c/f_M$ укладываемых на расстоянии $2D$); $\varphi/2\pi$ – дробная часть фазового цикла $0 \leq \varphi \leq 2\pi$. Для определения числа M измерения D производят на нескольких частотах.

2.3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРОВ В ФИЗИКЕ И ХИМИИ

Изобретение и последующие разработки лазеров опирались на фундаментальные исследования в области физики и (в меньшей степени) химии. Естественно, что в первую очередь следует рассмотреть применения лазеров в физике и химии [4].

В физике использование лазеров, с одной стороны, привело к открытию совершенно новых областей исследования, а с другой – в огромной степени способствовало развитию некоторых уже существующих. Следует также признать, что изучения свойств лазера и взаимодействия лазерного излучения с веществом сами составляют развивающиеся направления исследования в физике.

Особенно интересным примером новой области исследования является *нелинейная оптика*. Высокая интенсивность лазерного пучка позволяет наблюдать явления, обусловленные нелинейным откликом среды. Отметим, в частности, такие процессы, как генерация гармоник и вынужденное рассеяние.

Генерация гармоник состоит в том, что соответствующие вещества при падении на них лазерного пучка с частотой ν могут излучать новый когерентный пучок с частотой 2ν (вторая гармоника), 3ν (третья гармоника) и т. д.

Процесс вынужденного рассеяния характеризуется тем, что падающий лазерный пучок с частотой ν , взаимодействуя с имеющимся в среде возбуждением с частотой ν_q (например, с акустической волной), приводит к возникновению когерентного излучения с частотой $\nu - \nu_q$ (стоксово рассеяние). Разность энергий падающего фотона $h\nu$ и излученного $h(\nu - \nu_q)$ передается тому же возбуждению.

Особо важными примерами вынужденного рассеяния являются вынужденное комбинационное рассеяние (в наиболее часто встречающемся случае оно связано с возбуждением, определенным собственным колебанием отдельной молекулы вещества) и вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна (здесь квантами возбуждения вещества являются акустические звуковые волны). Оба процесса – генерация гармоник и вынужденное рассеяние – могут иметь высокую эффективность преобразования (десятки процентов). Поэтому на практике для получения интенсивных когерентных пучков с частотами, отличными от частоты падающего пучка, применяют и генерацию гармоник, и вынужденное рассеяние (в частности, комбинационное рассеяние, поскольку оно позволяет получить большой сдвиг частоты).

В физике и химии важную роль играют измерения характеристик различных сред после того, как они подверглись воздействию коротких световых импульсов. Эти измерения требуют высокого разрешения во времени. Применение лазеров существенно увеличивает возможности таких измерений.

Действительно, если обычные источники света позволяют получать импульсы длительностью до 0,1 нс, то современные лазеры могут излучать импульсы длительностью до 0,1 пс. Благодаря использованию таких импульсов можно выполнять измерения быстропротекающих процессов с высоким разрешением во времени, что приводит к новым возможностям для исследования широкого круга явлений. Поскольку в физике, химии и биологии многие важные процессы протекают в пикосекундном диапазоне, то применение лазеров приводит к новым достижениям.

Существует еще одна область исследований, которая благодаря применению лазера не только расширила свои прежние возможности, но и получила совершенно новые идеи. Этой областью является *спектроскопия*. Для некоторых лазеров удается сузить полосу генерации до десятков кГц (в видимой и ИК-диапазонах спектра), что позволяет проводить спектроскопические измерения с разрешающей способностью, которая на много порядков (от 3 до 6) превышает разрешение, достигаемое с помощью обычных спектроскопических методов.

Появление лазеров привело также к развитию нового направления, а именно *нелинейной спектроскопии*, в которой разрешение спектральных линий может стать намного выше предела, обусловленного эффектами, связанными с доплеровским уширением. Это открыло путь новому и более детальному изучению структуры вещества.

В химии лазеры применяются как в целях диагностики, так и для получения необратимых химических изменений (лазерная фотохимия). Что касается методов диагностики, то следует особо упомянуть резонансное комбинационное рассеяние и когерентное антистоксово комбинационное рассеяние. Эти методы дают важную информацию о структуре и свойствах многоатомных молекул (например, значения частоты активных рамановских колебаний, вращательных констант, постоянной ангармоничности). Когерентное антистоксово комбинационное рассеяние можно использовать также для измерения концентрации (и температуры) различных молекулярных соединений в некотором ограниченном объеме пространства. Это находит свое применение при глубоком исследовании процессов сгорания в пламени и плазмы (электрического разряда).

Пожалуй, наиболее интересным (или, по крайней мере, обещающим стать таким) химическим применением лазера является *фотохимия*. Однако следует иметь в виду, что из-за высокой стоимости ла-

зерных фотонов промышленное использование лазерной фотохимии будет оправдано лишь при очень высокой цене конечного продукта.

Таким случаем является *разделение изотопов* (в частности, урана и дейтерия). Основная идея здесь состоит в том, чтобы лазерный пучок избирательно возбуждал только те изотопы, которые необходимо выделить. Эти изотопы, находящиеся в возбужденном состоянии, нетрудно отличить и, следовательно, отделить (возможно, химическими методами) от нежелательных соединений, оставшихся в невозбужденном состоянии.

Например, в случае урана используются следующие два метода.

1. Фотоионизация частиц (^{235}U), которые необходимо выделить, светом соответствующей длины волны после того, как эти частицы были излучательно переведены в некоторое возбужденное состояние. Ионизованные таким образом изотопы собирают вместе, прикладывая необходимое постоянное напряжение. В этом методе сырье берется в виде атомарного газа.

2. Избирательная диссоциация молекулярного соединения урана (например, гексафторида урана). При этом молекулярное соединение избирательно переводят в возбужденное состояние (колебательное) только одного изотопного состава (в данном случае $^{235}\text{UF}_6$), а затем с помощью последующей оптической накачки добиваются его диссоциации. В этом случае гексафторид урана используется в виде молекулярной струи при низкой температуре ($T < 50 \text{ K}$).

2.4. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Возможность использования лазерного луча для связи через атмосферу вызвала сначала очень большой энтузиазм, поскольку лазеры в принципе имеют два важных преимущества. Во-первых, это широкая полоса частот, а количество информации, передаваемой данной несущей волной, пропорционально ширине ее полосы частот [4].

При переходе от микроволнового к оптическому диапазону частота несущей увеличивается приблизительно в 10^4 раз, что позволяет использовать значительно более широкую полосу частот.

Во-вторых, это малая длина волны излучения. Поскольку длина волн лазерного излучения примерно в 10^4 раз меньше длин волн, типичных для микроволновой техники, можно показать, что при одном и том же диаметре пучка D расходимость светового излучения в 10^4 раз меньше микроволнового. Для получения той же расходимости антенна оптической системы (зеркало или линза) может иметь гораздо меньшие размеры.

Однако оба этих преимущества сводятся к нулю, поскольку в условиях плохой видимости свет быстро затухает в атмосфере. Поэтому приме-

нение лазеров в открытой (без использования волновода) связи ограничилось двумя (хотя и очень важными) случаями.

Одним из них является осуществление космической связи между двумя спутниками или между спутником и наземной станцией, расположенной в особо благоприятных климатических условиях. В этом случае используется либо Nd : YAG - лазер (со скоростью передачи информации до 10^9 бит/с), либо CO₂ – лазер (со скоростью передачи до $3-10^8$ бит/с). Хотя CO₂ – лазер имеет более высокую эффективность, он требует более сложной детектирующей системы и имеет тот недостаток, что длина волны его излучения примерно в 10 раз больше, чем длина волны Nd : YAG – лазера. Другим случаем применения лазера является осуществление связи на малых расстояниях, например при передаче информации внутри здания. Здесь наибольший интерес представляют полупроводниковые лазеры.

Однако весьма привлекательным в области оптической связи является в настоящее время использование *оптических волноводов* (волоконной оптики). Явление направленного распространения света вдоль волокон известно уже много лет. Однако прежде оптические волноводы использовались на очень коротких расстояниях, как правило, в медицинских приборах для эндоскопии. В конце 60-х гг. прошлого века затухание в лучших оптических стеклах составляло около 1000 дБ/км. С тех пор благодаря совершенствованию технологии изготовления оптических волокон из стекла и кварца в случае кварца удалось получить затухание меньше чем 0,2 дБ/км (нижний предел определяется рэлеевским рассеянием внутри материала волокна).

Столь низкое затухание энергии в оптических волноводах открывает большие возможности их использования для дальней связи.

Типичная волоконно-оптическая система связи состоит из источника света, устройства оптического согласования, направляющего свет в волокно, и приемника (фотодиода), устанавливаемого на конце линии связи и также согласованного с оптическим волноводом.

Вдоль линии связи располагают ретрансляторы, причем расстояние между ними может составлять 2-50 км и более. Ретранслятор состоит из приемника и излучателя. В качестве источников света используются твердотельные или полупроводниковые лазеры на двойной гетероструктуре. Теперь время эксплуатации этих лазеров доведено до 10^6 ч.

Хотя до сих пор наибольшее распространение получили лазеры на GaAs, более привлекательным является применение лазеров на гетеропереходах, в которых активный слой лазера представляет собой сложный четверной сплав $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$. В этом случае *p*- и *n*-области переходов состоят из простого бинарного соединения InP, и, используя сплав при $y = 2,2x$, можно добиться того, что решетка четверного сплава будет согласована с InP. Выбирая соответствующим образом величину x , можно

получить длину волны излучения, равной либо 1,3, либо около 1,6 мкм в соответствии с двумя минимумами поглощения в кварцевом волокне.

В зависимости от диаметра d сердцевины оптический волновод может быть как одномодовым ($d = 1$ мкм), так и многомодовым ($d = 50$ мкм). В линиях связи, эксплуатируемых в настоящее время, скорость передачи информации в которых достигает 50 Мбит/с, применяют, как правило, многомодовые оптические волноводы. В системах, предназначенных для работы с более высокими скоростями передачи, по-видимому, лучше подходят одномодовые оптические волноводы.

Приемником обычно является лавинный фотодиод, хотя возможно также и использование $p-i-n$ -диода с соответствующей усилительной микросхемой. Применение оптических волноводов в связи не ограничивается дорогостоящими системами дальней связи. Для передачи информации на более короткие расстояния, например, внутри здания, на борту самолета или корабля, используются некогерентные светодиоды, согласованные с многомодовым оптическим волноводом.

2.5. ЛАЗЕРЫ В ПРОЦЕССАХ ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ

Такие свойства лазеров, как направленность, яркость и монохроматичность, сделали их весьма полезными для множества методов измерения и контроля в промышленности при управлении станками и в строительстве [4]. Помимо этих вопросов рассмотрим также применение лазеров в геодезических измерениях и для контроля за чистотой окружающей среды.

В промышленности лазеры нашли наибольшее применение для ***юстировки и выравнивания конструкций***.

Высокая направленность излучения лазеров позволяет использовать их в качестве идеального инструмента для создания прямой эталонной линии при установке и выравнивании деталей в самолетостроении и в строительстве, например, при возведении зданий, мостов или туннелей. Здесь лазер во многих случаях заменил применявшиеся ранее оптические инструменты, такие, как коллиматоры или телескопы. Для этих названных целей обычно применяют He-Ne лазер низкой мощности (1-5 МВт) с излучением в видимом диапазоне. Во многих случаях юстировку и выравнивание производят с помощью полупроводниковых датчиков, выполненных в виде квадрантов (рис. 2.4).

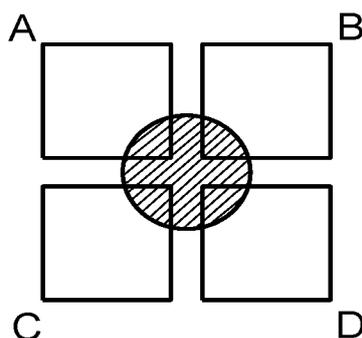


Рисунок 2.4 – Использование квадрантного детектора для юстировки

Когда лазерный пучок (заштрихованная область на рисунке) оказывается идеально сцентрированным, фототоки от четырех датчиков А, В, С и D совпадают.

Положение лазерного пучка на приемнике определяется значением фототока, измеренным от каждого квадранта. При этом установка и выравнивание сводятся к простым электрическим измерениям, что позволяет избежать субъективной оценки оператора (что зачастую было причиной ошибок при использовании прежних оптических систем). Достижимая на практике точность установки в заводских условиях колеблется примерно от 5 мкм (на расстоянии около 5 м) до 25 мкм (на расстоянии около 15 м).

Лазеры также используют для *измерения расстояний*. При этом в зависимости от того, какие приходится измерять расстояния, применяются различные методы. Короткие расстояния (до 50 м) обычно измеряют с помощью интерферометрических методов, используя в качестве источника света стабилизированный по частоте He-Ne лазер. Средние расстояния (до 1 км) измеряют с помощью телеметрических методов, используя модулированное по амплитуде излучение He-Ne или GaAs-лазеров. Еще большие расстояния определяют, измеряя время пролета отраженного объектом короткого (возможно, несколько десятков наносекунд) светового импульса от Nd : YAG – или CO₂ – лазера.

Интерферометрические методы измерения расстояний обычно основаны на использовании интерферометра Майкельсона. С помощью делителя лазерный пучок расщепляется на измерительный и опорный пучки. Опорный пучок отражается неподвижным зеркалом, в то время как измерительный – зеркалом, прикрепленным к объекту, расстояние до которого нужно измерить.

Оба отраженных пучка затем снова соединяются, интерферируют, и их результирующая амплитуда измеряется детектором. Если объект сдвигается вдоль направления лазерного пучка на расстояние $\lambda/2$, где λ – длина волны лазера, то интерференционный сигнал проходит от максимума через минимум опять к максимуму.

Следовательно, используя соответствующее электронное устройство, отсчитывающее интерференционные полосы, мы можем получать данные о смещении объекта. Этот метод измерения, обычно применяемый в цехах прецизионной обработки деталей, позволяет измерять расстояния с относительной погрешностью, равной одной миллионной.

Следует заметить, что с помощью такого метода расстояние можно измерить лишь относительно некоторого исходного положения. Преимущество интерферометрического метода состоит в том, что он позволяет получать результаты быстро, с высокой степенью точности и что его легко совместить с автоматическими системами управления.

Телеметрический метод с амплитудной модуляцией применяется для измерения больших расстояний. В этом случае лазерный пучок He–Ne– или GaAs– лазера модулируется по амплитуде и расстояние определяется по разности фаз между испущенным и отраженным лазерными пучками. Относительная погрешность здесь также составляет одну миллионную (т.е. 1 мм на 1 км расстояния). Этот метод находит применение в геодезии и картографии. Расстояния больше одного километра определяются по времени пролета короткого лазерного импульса (10–50 нс), излученного рубиновым или Nd : YAG – лазером в режиме модуляции добротности или ТЕА – CO₂ – лазером. Эти измерения представляют интерес главным образом для военной техники (лазерный дальномер). Среди невоенных применений следует отметить измерение расстояния от Земли до Луны (с точностью около 20 см) и локацию спутников.

Другая область, в которой нашли применение такие свойства лазеров, как направленность и монохроматичность, – это *измерения концентрации различных загрязнений* в атмосфере.

Традиционный способ требует взятия пробы (что не всегда просто осуществить) и проведения соответствующего химического анализа. Такой способ не позволяет быстро получить необходимые данные и с большим трудом поддается автоматизации.

В лазерном методе исследуемая область атмосферы облучается соответствующим лазерным пучком, а свет, рассеянный этой областью атмосферы, собирается телескопом и подвергается анализу.

Соответствующая система получила название «оптический радар» или «лидар» (от англ. Light detection and ranging). При взаимодействии лазерного излучения с атмосферными загрязнениями происходит несколько явлений, а именно упругое рассеяние, комбинационное рассеяние, флуоресценция и поглощение. Каждое из этих явлений используется для обнаружения и измерения концентрации большого числа различных атмосферных загрязнителей (SO₂, NO₂, NO и т. п.). Для этих целей применяются как рубиновый лазер, так и Nd : YAG – лазер с удвоителем частоты,

лазеры на красителях и различные лазеры, генерирующие в средней ИК-области (HF, DF, CO₂).

2.6. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ В ТЕРМОЯДЕРНОМ СИНТЕЗЕ

Осуществление термоядерного синтеза и использование его в мирных целях позволят человечеству получить неограниченный источник энергии. Главная проблема при производстве энергии путем термоядерного синтеза заключается в том, чтобы получить и затем удержать плазму, состоящую из тяжелых изотопов водорода (дейтерий D и тритий T). Для того, чтобы могла идти сильно экзотермическая реакция синтеза ($D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$, где n-нейтрон), плазма должна иметь достаточно высокую температуру ($T = 10^8$ К). Существуют два принципиальных подхода к решению задачи получения и удержания плазмы.

Во-первых, это хорошо известное магнитное удержание, когда плазма относительно малой плотности удерживается более или менее долгое время внутри специальной «магнитной бутылки».

Во-вторых, можно осуществить инерциальное удержание плазмы. В последнем методе, который появился позже, дейтерий-тритиевая плазма мгновенно нагревается и удерживается собственной инерцией. Это означает, что в течение короткого времени, до того как произойдет гидродинамический разлет плазмы, в результате достаточно интенсивной термоядерной реакции должно высвободиться большое количество энергии (взрывная реакция).

Предполагают, что лазеры позволяют осуществить инерциальное удержание плазмы, поскольку лазерное излучение может обеспечить быстрый разогрев плазмы [4]. Жидкие дейтерий и тритий содержатся в микросферах размером один миллиметр в диаметре и облучаются лазером, имеющим достаточно высокую энергию и импульс, чтобы инициировать протекание ($D + T$) – реакции (микровзрыв).

Как показали сложные вычисления, для эффективного производства термоядерной энергии требуется не только нагрев такой микросферы до очень высокой температуры, но и сжатие образующейся в ней плазмы до плотности, которая примерно в 10^4 раз больше, чем плотность исходной жидкости. Для этого требуется, чтобы нагрев микросферы с топливом был сферически симметричным, а лазерное излучение имело специальное распределение во времени. Под действием излучения в микросфере происходят следующие явления.

Сначала под действием предварительного импульса вследствие испарения внешнего слоя микросферы вокруг ее поверхности образуется облако разреженной плазмы. Это облако затем облучается более или менее симметрично вторым более мощным импульсом. Последующее поглощение энергии внешней областью микросферы приводит к сильному разлету вещества за счет испарения его с поверхности, что производит сильнейшее сжатие мик-

росферы. В момент максимального сжатия должен прийти наиболее интенсивный импульс, чтобы произвести собственно реакцию синтеза.

В своей простейшей форме лазерный термоядерный реактор должен состоять из камеры сгорания, в центр которой инжектируются микросферы со скоростью несколько штук в секунду. Каждая из микросфер облучается лазерным импульсом высокой энергии, что приводит к микровзрыву с выделением энергии. Во время реакции синтеза энергия высвобождается в форме кинетической энергии нейтронов (порядка 14 МэВ), заряженных частиц и электромагнитного излучения.

Чтобы получить электрическую энергию, вокруг камеры сгорания должна быть помещена оболочка (бланкет) из жидкого лития, которая будет поглощать энергию термоядерной реакции. Литий циркулирует вдоль теплообменников, которые производят пар, используемый в дальнейшем стандартным образом.

Лазер, с помощью которого можно осуществить описанный выше микровзрыв, должен иметь длину волны где-то между 250 и 2000 нм, энергию импульса $1 \cdot 10^6$ - $3 \cdot 10^6$ Дж, длительность импульса $5 \cdot 10^{-9}$ - $10 \cdot 10^{-9}$ с и, следовательно, пиковую мощность более 200 ТВт. Он должен генерировать с частотой повторения импульсов, равной нескольким герцам, и, следовательно, обеспечивать среднюю мощность ~ 10 МВт. Лазер также должен иметь КПД порядка 1 % и требовать для питания не менее 1 ГВт электрической мощности.

Несмотря на огромные технические и инженерные трудности, связанные с решением такой задачи, проекты создания больших лазерных установок для термоядерного синтеза развиваются в нескольких странах, но наиболее заметно в США и России.

Все эти лазеры работают по схеме усилителя мощности задающего генератора (МОПА, от англ. Master oscillator power amplifier). Лазерный импульс формируется генератором малой мощности, который позволяет с достаточной степенью точности управлять пространственными и временными параметрами импульса. Это излучение с помощью делителей расщепляется на несколько пучков, каждый из которых усиливается. Усиленные пучки направляются затем по радиально-симметричным путям на мишень.

В США уже имеются лазерные установки, дающие импульсы с энергией около 20 кДж и пиковой мощностью 20-50 ТВт. Это системы, использующие CO₂ – лазеры и лазеры на неодимовом стекле, с шестью пучками в случае CO₂ – лазера (системы «Гелиос») и с двадцатью пучками в случае лазера на неодимовом стекле (система «Аргус»).

Строятся системы, дающие на порядок большие энергию и мощность (система «Нова» с усилителями на неодимовом стекле и система «Антарес» с усилителями на CO₂). В России создана установка с 256 пучками, использующая лазер на неодимовом стекле (лазерная установка «Дельфин»).

Некоторые из этих лазеров уже использовались для инициирования термоядерных реакций с несколькими типами мишеней, Было зарегистрировано большое число нейтронов, что указывает на возникновение термоядерной реакции. Наблюдалось также сжатие мишени.

Однако получаемые результаты еще далеки от того, чтобы термоядерная энергия была равна энергии, подводимой к лазеру. Существует единодушное мнение, что сооружение термоядерного реактора, если это вообще осуществимо, не будет закончено в начале XXI столетия.

Естественно, существуют и другие области применения лазеров и лазерной техники в науке. Это биология и теоретическая медицина, оптическая обработка и запись информации, память сверх большого объема и многое другое.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назначение лазерных измерителей скорости.
2. Перечислите традиционные способы измерения скорости и их основные недостатки.
3. В какой области науки и техники используют лазерные доплеровские измерители скорости ЛДИС?
4. Поясните сущность эффекта Доплера.
5. Объясните действие установки ЛДИС по схеме с опорным лучом.
6. Назовите динамический диапазон скоростей, измеряемых с помощью ЛДИС.
7. Объясните действие установки ЛДИС по дифференциальной схеме с рассеянием назад.
8. Объясните преимущества и недостатки каждого из рассмотренных методов измерения скоростей.
9. Какими свойствами должны обладать среды при использовании в них ЛДИС?
10. Каковы требования к конструкции оптического блока ЛДИС?
11. Назовите области применения лазерных дальномеров.
12. Охарактеризуйте и поясните типовую оптическую схему лазерного дальномера.
13. Охарактеризуйте способы измерения расстояния до объектов.
14. Поясните суть импульсного метода определения расстояний.
15. Каким образом применяются лазеры в нелинейной оптике?
16. Назначение лазеров в спектроскопии?
17. Поясните применение лазеров в современной химии.
18. В чем особенности применения лазеров для оптической связи?
19. Что такое оптические волноводы?
20. Какие лазеры применяются для оптической связи?
21. В чем состоят особенности применения лазеров в процессах измерения и контроля?

22. Что такое лазерная юстировка и выравнивание конструкций?
23. В чем состоит суть применения квадрантного детектора для юстировки?
24. Как используют лазеры для измерений малых расстояний?
25. Как измеряют концентрации различных загрязнений в атмосфере?
26. В чем суть термоядерного синтеза?
27. Какие существуют способы получения и удержания плазмы?
28. Назначение лазера в термоядерном синтезе?

3. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ В ТЕХНИКЕ

3.1. ОПТИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЯ

Голография – метод получения изображения объектов, основанный на регистрации интерференционной картины, образующейся в результате суперпозиции предметной и опорной волны на светочувствительном материале. Полученная интерферограмма называется *голограммой*. На ней отсутствуют элементы, хотя бы отдаленно напоминающие оригинал, и тем не менее записана полная информация одновременно об амплитуде и фазе волн, рассеянных объектом [1, 5].

Дифракция опорного излучения на голограмме приводит к восстановлению предметной волны, то есть изображению объекта.

В наличии информации о фазе и амплитуде заключается принципиальное различие голографии от метода фотографии, где регистрируется информация только об амплитуде.

Метод голографии был впервые предложен английским физиком Д.Габором. В 1948 г. Д.Габор, занимаясь улучшением качества изображения в электронных микроскопах, открыл новый метод восстановления амплитуды и фазы световых волн. Он предложил регистрировать голограмму с помощью электронного пучка, а для получения изображения освещать ее пучком видимого света.

Несмотря на значительные усилия, ожидаемое качество изображения с разрешением порядка 1 \AA так и не было достигнуто. Когда Габор проводил свои первые эксперименты, источники света не удовлетворяли условиям когерентности, и качественных голограмм получить не удавалось.

Второе рождение голографии относится к 1962-1963 гг., когда Ю.Денисюк, Э.Лейт, Ю.Упатниекс применили для нее лазеры и методы лазерной техники. Лазеры поставили голографию на прочный практический фундамент.

Принцип голографии можно сформулировать следующим образом. Это двухэтапный (иногда безлинзовый) процесс получения объемного изображения объекта.

На первом этапе полная информация, заключенная в фазе и амплитуде световых волн, рассеянных объектом, записывается на голограмме интерференционной картиной, возникающей как результат взаимодействия опорной и предметной волн.

На втором этапе для восстановления изображения объекта голограмму освещают опорным пучком света. Вследствие дифракции излучения на голограмме образуется объемное изображение объекта. Получение голограммы обязательно требует когерентности излучения, что в оптиче-

ском диапазоне длин волн обеспечивается применением желательного одно-модовых лазеров.

Попытаемся представить математическую модель процесса голографии и простейшую модель голограммы. Допустим, что на светочувствительный слой фотопластинки падают две волны: опорная \bar{E}_0 и предметная \bar{E}_j . Комплексные амплитуды этих волн в плоскости голограммы запишутся так:

$$\bar{E}_0 = A_0(x, y)e^{j\varphi_0(x, y)}; \quad (3.1)$$

$$\bar{E}_j = A_j(x, y)e^{j\varphi_j(x, y)}.$$

Суммарная комплексная амплитуда поля излучения в плоскости голограммы:

$$\bar{E}_0 + \bar{E}_j = A_0(x, y)e^{j\varphi_0(x, y)} + A_j(x, y)e^{j\varphi_j(x, y)}. \quad (3.2)$$

Как известно, распределение освещенности ε интерференционной картины пропорционально квадрату модуля комплексной амплитуды:

$$\begin{aligned} \varepsilon(x, y) &= a|E_0 + E_j|^2 = a(E_0 + E_j)(E_0 + E_j)^* = \\ &= a(E_0E_0^* + E_jE_j^* + E_0E_j^* + E_0^*E_j). \end{aligned} \quad (3.3)$$

Или, учитывая (3.1), получаем:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= a[A_0^2 + A_j^2 + A_0A_j e^{j(\varphi_j - \varphi_0)} + A_0A_j e^{-j(\varphi_j - \varphi_0)}] = \\ &= a[A_0^2 + A_j^2 + 2A_0A_j \cos(\varphi_j - \varphi_0)]. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Зависимость (3.4) является уравнением голограммы. Минимальная и максимальная освещенность интерферограммы определяются соответственно из условий:

$$(\varphi_j - \varphi_0) = 2\pi; \quad \varphi_j = \varphi_0; \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_{\min} \sim a(A_0 - A_j)^2;$$

$$\varepsilon_{\max} \sim a(A_0 + A_j)^2,$$

где α – коэффициент пропорциональности.

Контрастные участки голограммы сравнительно просто определить, если известны ε_{\min} и ε_{\max} :

$$k = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min}} = \frac{2A_0A_j}{A_0^2 + A_j^2}. \quad (3.6)$$

Расстояние между интерференционными полосами (период) в случае записи простейшей голограммы – дифракционной решетки с равномерно чередующимися светлыми и темными полосами, полученной при регистрации двух плоских волн, определяется:

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2 \sin \Theta}, \quad (3.7)$$

где Θ – угол между опорным и предметным лучами.

Величина экспозиции $H_0 = \varepsilon t \dot{\gamma}$ (взаимодействие излучения, проникающего извне, с фоточувствительным материалом называется внешней экспозицией, внутренняя экспозиция определяется рассеянием излучения в фотоэмульсии) определяется как:

$$\begin{aligned} H_0 &= a \left[A_0^2 + A_j^2 + 2A_0A_j \cos(\varphi_j - \varphi_0) \right] \cdot t_y = \\ &= a t \dot{\gamma} \left(A_0^2 + A_j^2 \right) \cdot [1 + k \cos(\varphi_j - \varphi_0)], \end{aligned} \quad (3.8)$$

где t_y – время экспонирования.

При восстановлении изображения объекта коэффициент пропускания τ проявленной голограммы есть линейная функция экспозиции $\tau = \tau_0 + \tau_1 \varepsilon t \dot{\gamma}$. Это будет справедливо, если использовать линейный участок характеристики чувствительности фотоэмульсии пластинки.

Освещая голограмму опорной волной, получим:

$$\tau \cdot E_0 = \left[\tau_0 + \tau_1' (A_0^2 + A_j^2) \right] E_0 + \tau_1' A_0^2 E_j + \tau_1' E_0^2 E_j^* = \omega_0 + \omega_{+1} + \omega_{-1}, \quad (3.9)$$

где $\tau_1' = a \tau_1 t \dot{\gamma}$.

Каким же источникам излучения соответствует найденное распределение поля? Первое слагаемое $\omega_0 = \left[\tau_0 + \tau_1' (A_0^2 + A_j^2) \right] E_0$ представляет волну, которая распространяется в направлении опорной волны. Это так называемая волна нулевого порядка, которая проходит через голограмму без искажения ω_0 (рис. 3.1).

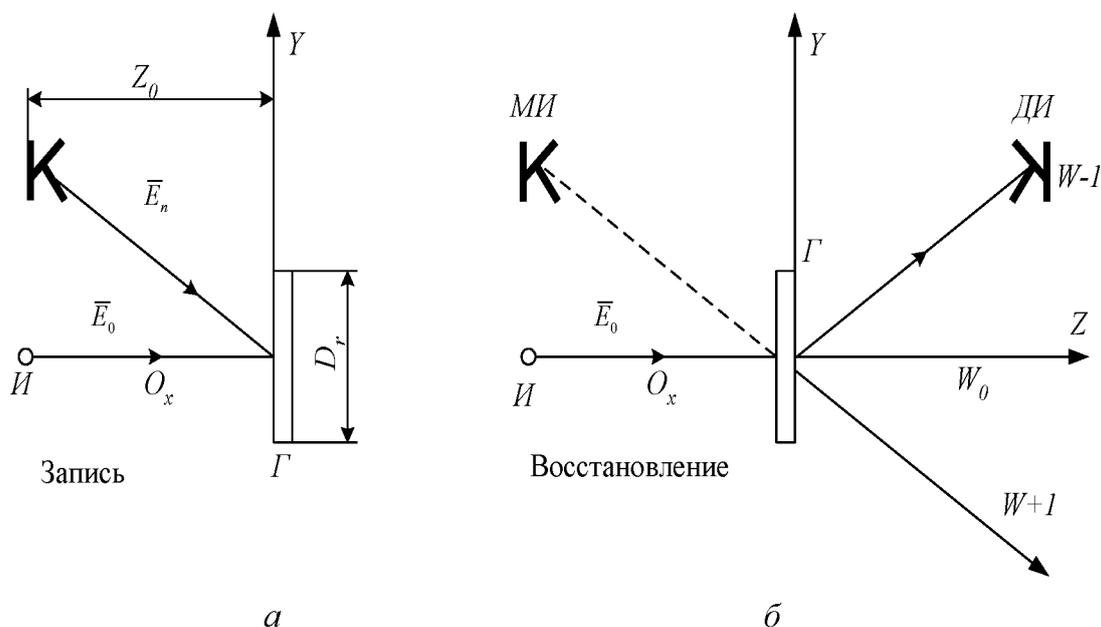


Рисунок 3.1 – Модель двухэтапного голографического процесса: процессы записи голограммы (а) и восстановления голограммы (б) объекта К (на рисунке: И – источник, лазер; E_0 – опорная волна; E_n – предметная волна; МИ – мнимое изображение; ДИ – действительное изображение; Г – голограмма)

Второе слагаемое $\omega_{+1} = \tau'_1 A_0^2 E_j$ – это волна плюс первого порядка. Она образует **мнимое изображение** регистрируемого объекта в том месте, где он находился в момент получения голограммы. Наблюдатель, воспринимающий ее, будет видеть объект висящим за голограммой, как в обычном зеркале.

Третье слагаемое ω_{-1} уравнения (3.9) является волной минус первого порядка. Это волна, сопряженная с исходной предметной волной. Она распространяется под некоторым углом к волне, освещающей голограмму, по другую сторону от волны нулевого порядка. Эта волна образует **действительное изображение**, которое является псевдоскопическим изображением, то есть имеющим «вывернутую наизнанку» конфигурацию исходного объекта. Его также можно наблюдать, так как оно расположено перед голограммой.

Рассмотрим основные свойства голограммы. Уникальным свойством является то, что **каждый участок голограммы содержит информацию обо всем объекте**. И если голограмму разбить на несколько участков, то каждый из них позволяет создать полное изображение объекта. Правда, при этом качество изображения ухудшается, так как происходит распределение светового поля $\bar{E}(x, y)$ на поверхности голограммы и изменяется разрешающая способность.

Следующее интересное свойство голограммы состоит в **возможности наблюдения голограммы на разных длинах волн**. Запись голограммы происходит на коротких волнах (например, на рентгеновских), а восстанов-

ление – в видимом диапазоне длин волн, что очень ценно для микроскопии, так как дает значительное увеличение. Но при этом необходимо помнить, что при восстановлении изображения объекта возможны искажения.

Самым замечательным свойством голограммы является **объемность изображения объекта** – следствие регистрации на голограмме пространственной структуры волн с их фазами и амплитудами. Причем, фаза кодируется относительной плотностью, а амплитуда – контрастом интерференционной картины. Регистрация приходящих от различных точек объекта фазовых соотношений, чего нет в обычной фотографии, дает информацию об относительных расстояниях до различных точек объекта. Это и определяет объемность изображения, которое можно наблюдать и даже фотографировать с различных точек пространства. Отметим, что на полученных снимках можно заметить параллакс и глубину резкости ближнего и дальнего планов – неизбежные характеристики объемности.

Еще одно уникальное свойство голограммы заключается в том, что на одной фотопластинке возможно последовательно зафиксировать несколько изображений различных объектов и каждое из них восстанавливать без особых помех и независимо от других изображений. На этом свойстве базируется разработка оптических запоминающих устройств. Если практически освоить это свойство, то это позволит создать голографический цветной и объемный кинематограф.

Все многообразие схем записи голограмм и восстановление изображений практически можно свести к двум классическим: **осевым схемам регистрации** (голография Габора – Френеля), использующим опорный луч, прошедший через предмет без рассеяния соосно с рассеянным пучком, и **внеосевым схемам записи** с разделением опорного и предметного пучка. Этот метод и схему предложили в 1962 г. Э.Лейт и Ю.Упатниекс.

При получении **осевой голограммы** лазерное излучение расширяют с помощью объектива, состоящего из пары линз Л1, Л2 (рис. 3.2). Диафрагма D пропускает только центральное дифракционное пятно первой линзы Л1, что позволяет получить достаточно плоский фронт волны Ф. Эта волна освещает прозрачный предмет Т, например, транспарант, который вносит в волновой фронт некоторые искажения.

Можно представить, что волна, распространяющаяся после предмета, состоит из плоской волны Φ_0 – невозмущенной, опорной волны, и волны возмущенной, дифрагированной Φ' на элементах предмета.

Полученная голограмма явится результатом интерференции волн Φ_0 и Φ' . Оптические пути опорной и дифрагированных волн мало отличаются и разность их хода невелика, что позволяет применить источник с небольшой временной когерентностью. Интенсивность опорного пучка при восстановлении, как правило, больше интенсивности дифрагированного пучка. Поэтому яркость восстановленного изображения невелика. Помимо этого, паразитные волны не нулевых порядков накладываются на опорную

волну и сильно ухудшают качество полученного изображения.

Отсутствие пространственного разделения опорного и предметного пучков составляет основной недостаток этой схемы.

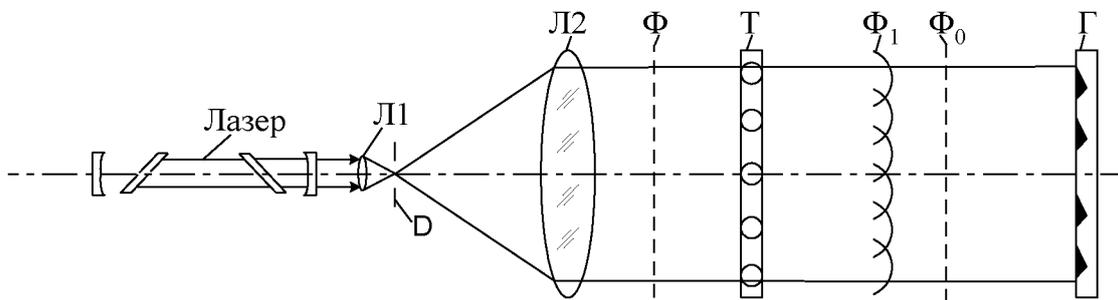


Рисунок 3.2 – Осевая голограмма: Л1 и Л2 – линзы конденсора; D – диафрагма; Т – объект записи; Г – голограмма; Φ , Φ_0 , Φ_1 – фронты волн

Внеосевая схема голографии представляет собой запись на фотослое пластинки картины интерференции предметной волны, рассеянной объектом, с комплексной амплитудой $A_i e^{j\varphi_i}$ и когерентной с ней опорной волны $A_0 e^{j\varphi_0}$. Как правило, поступают так, чтобы два интерферирующих пучка имели общий источник излучения. Это достигается пространственным разделением пучка с помощью полупрозрачных пластин – светоделителей, призм и зеркал. Деление лазерного луча удобно выполнять с помощью многослойного диэлектрического зеркала, коэффициент отражения которого можно изменять в широких пределах поворотом зеркала относительно падающего луча (рис. 3.3).

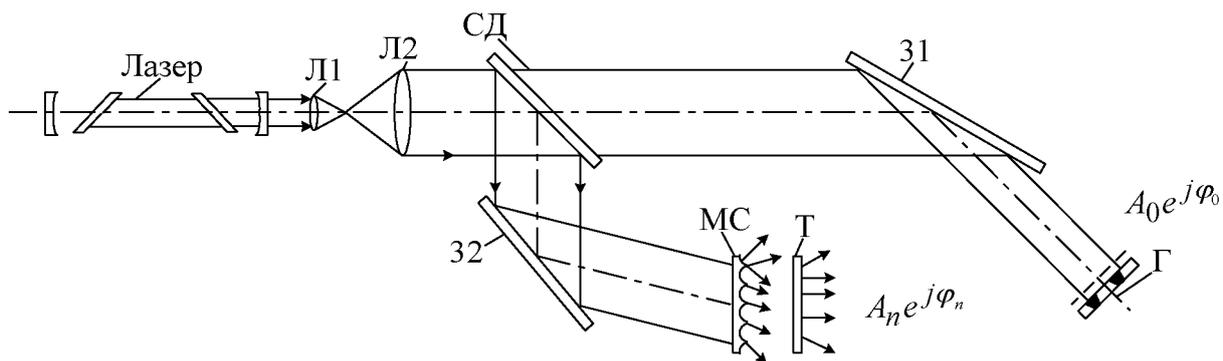


Рисунок 3.3 – Внеосевая голограмма: Л1, Л2 – линзы конденсора; СД – светоделитель; 31, 32 – зеркала; МС – матовое стекло; Т – объект записи; Г – голограмма

Такое разделение полностью устраняет взаимные помехи между действительным и мнимым изображением. Волны дифрагируют под различными углами, не накладываются друг на друга и не создают помехи наблюдению.

Этим внеосевые голограммы заметно отличаются от голограмм Габора, в которых полностью разделить дифрагированные волны почти не удастся.

Приведем некоторые специфические требования к процессу голографии, к источнику излучения и фотоматериалам, выполнение которых необходимо для получения хороших голограмм. На качество изображения интерферограммы влияют в основном две причины: механическая жесткость элементов голографической установки и способность излучения создавать стабильную и контрастную интерференционную картину. Излучение, способное это сделать, должно быть когерентным во времени и в пространстве.

В зависимости от свойств фотослоя пластинки качество интерференционной картины и, следовательно, качество восстановленного изображения будет различным. Поэтому характеристики фотоматериалов играют также важную роль в голографии.

Основной характеристикой фотоматериалов является частотно-контрастная характеристика, которая однозначно определяет разрешающую способность фотоматериала, то есть число интерференционных линий, записанных на единице длины пластинки. Разрешающая способность фотоэмульсии в голографии должна быть значительно выше, чем в фотографии, где довольствуются зачастую величиной 60 линий/мм. Наиболее распространенными фотоматериалами для голографии являлись «микрат» и «469 F Кодак» с разрешающей способностью 1500-2000 линий/мм. Фотоэмульсии должны иметь мелкозернистую структуру и быть однородными. Зернистость фотоэмульсии существенно влияет на качество изображения, создавая вредный фон в результате рассеяния опорной волны света на проявленных зернах.

Другой важной характеристикой эмульсии является чувствительность $\varepsilon \lambda$. Как правило, повышение разрешающей способности фотослоя сопровождается падением его чувствительности. Для указанных выше фотоэмульсий и He-Ne лазера чувствительность составляет 10^{-4} - 10^{-6} Дж/см².

В настоящее время ведутся интенсивные исследования и поиски реверсивных фотоматериалов, допускающих перезапись информации. К таким материалам принято относить магнитные пленки, сегнетоэлектрические и электрооптические кристаллы, фотополупроводники, термопластические пленки и т.д.

Другой пример новых материалов для записи голограмм – термопластические носители – пленки (ТПН). На ТПН записываются также фазовые голограммы, которые можно восстанавливать как на просвет, так и на отражение. Чувствительность ТПН значительно выше чувствительности кристаллов, а разрешающая способность достигает 1000 штрихов/мм и больше. Термопластический слой при нагревании до температуры 100-105 °С размягчается и деформируется, повторяя распределение заряда на его поверхности. Это свойство ТПН используется следующим образом.

Структура пленки содержит термопластические смолы, фотоприем-

ный и прозрачный проводящий слой окиси олова на лавсановой или стеклянной основе. Проводящий слой создает электрический контакт с фотополупроводниковым слоем, а также служит своеобразным аккумулятором тепла на стадии проявления ТПН. На поверхность термопластика наносится однородный электрически заряд электронным лучом или специальным устройством коронного разряда. Затем проецируется интерференционная картина. Это запись голограммы. В освещенных участках происходит разрядка фотополупроводникового слоя и уменьшение электрического потенциала. Причем распределение зарядов соответствует записанной интерференционной картине. Через некоторое время 0,1 с потенциал поверхности ТПН изменяется: в освещенных участках возрастает, а неосвещенных – приобретает начальную величину.

Проявление производится быстрым нагревом ТПН до температуры 100 °С, протекающим через проводящий слой SnO. Нагрев размягчает термопластик. Под действием поверхностных сил натяжения ТПН деформируется, создавая на поверхности рельеф в соответствии с локальным распределением зарядов. При охлаждении до нормальной температуры (20 °С) термопластик затвердевает, сохраняя фазовую голограмму, соответствующую полученному фазовому рельефу.

Стирание всей записанной информации производится нагреванием ТПН до 110 °С, выборочное стирание – лазерным излучением или электронным лучом.

По схеме записи и по толщине слоя фотоэмульсии, в котором записывается интерференционная картина, голограммы могут быть разделены на плоские, объемные и цветные.

Плоские (тонкослойные) голограммы – это обычно тонкие светочувствительные пленки эмульсии с зарегистрированной в них интерферограммой, нанесенные на стекло. Их структура похожа на дифракционную решетку с периодом $\Lambda = \lambda_0 / \sin \Theta$. Плоская голограмма характеризуется функцией амплитудного пропускания дифрагирующей волны излучения – $\tau(x, y)$. При прохождении волны единичной амплитуды через заданный элементарный участок голограммы, подобный дифракционной решетке, непосредственно за голограммой образуются волны нулевого и первого порядков: $\tau \cdot E_0 = \omega_0 + \omega_{+1} + \omega_{-1}$. Последние два члена в (3.9) математически описывают дифрагированные волны $\omega_{\pm 1}$ порядка. Так как толщина пленки намного меньше расстояния между двумя соседними максимумами Λ системы полос интерференционной картины, то при прохождении параллельного опорного пучка через плоскую голограмму фронт волны разбивается на несколько различных направленных дифракционных пучков, наклонных по отношению к падающему пучку под различными углами $\pm \Theta$; $\pm 2\Theta$; $\pm 3\Theta$; ...; $\pm m\Theta$, где $\sin \Theta = \lambda_0 / \Lambda$. Один из этих пучков направлен также, как и падающий, но интенсивность его намного больше других пучков.

Если производится запись предмета сложной конфигурации на плоской голограмме, то каждая точка предмета образует на голограмме свою систему полос различного расположения и ширины. В этой ситуации получается плоская голограмма, тождественная сложной, нерегулярной дифракционной решетке. При восстановлении за голограммой имеют место две сферические волны, которые одновременно создают мнимое и действительное изображения предмета одинаковой интенсивности. Отметим, что внеосевые схемы голографии, как правило, образуют плоские голограммы.

Объемные (толстослойные) голограммы – это специальные интерференционные структуры, у которых расстояния между соседними поверхностями почернения много меньше толщины слоя ($\Lambda \ll \Delta$). Чем больше толщина слоя Δ , тем больше в нем образуется поверхностей почернения и тем точнее получается воспроизведение предмета. Поверхности почернения – это, по сути дела, пространственные изменения показателя преломления слоя. В отличие от плоской голограммы, в объемной голограмме необходимо отметить два замечательных свойства.

Восстановление изображения объекта производится не обязательно излучением лазера, а в свете любого немонахроматического источника излучения. При этом восстанавливается только одно изображение, действительное или мнимое, в зависимости от того, с какой стороны голограмма освещается. Впервые в 1962 г. объемные голограммы и метод их записи предложил Ю.Н. Денисюк.

Цветная голограмма представляет собой наложение интерференционных картин трех длин волн $\lambda_K; \lambda_E; \lambda_C$ на одной фотопластине.

Известно, что любое цветовое впечатление у наблюдателя можно создать сочетанием **трех основных цветов** – синего, желтого и красного – определенным образом подобранных интенсивностях пучков. На одной черно-белой фотопластинке наложением трех интерферограмм получают трехкомпонентную голограмму – сложнейшую интерференционную картину трех опорных и трех предметных пучков.

При восстановлении цветного изображения предмета эту сложную голограмму помещают в место экспозиции и освещают одновременно тремя опорными пучками с длинами волн $\lambda_K; \lambda_E; \lambda_C$. Каждый из пучков, проходя через голограмму, создает три действительных и три мнимых изображения – всего 18 изображений, из которых только три точно совпадают в пространстве и создают цветное изображение предмета.

Остальные изображения являются «фантомными» изображениями, ухудшающими качество восстановления. Чтобы улучшить качество, фантомные изображения необходимо разнести подальше друг от друга, что достигается выбором длины волны пучков и углового размера предмета. Вообще фантомные изображения можно отнести к необычным особенностям голографии – это явление, когда голограмма восстанавливает недостающие детали предмета по малой его части.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования разнообразных практических применений методов голографии, и в кругу специалистов наблюдается большой оптимизм в отношении результатов этих исследований. Список возможных применений голографии достаточно внушителен: это голографическое кино и телевидение, голографическая микроскопия и звуковидение, распознавание образов и запоминающие устройства в ЭВМ; это также интерференционный контроль и дефектоскопия, системы записи, кодирования и считывания информации и так далее и тому подобное.

3.2. ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

3.2.1. Действие на вещество мощного лазерного луча

Направим на поверхность какого-то материала, например металла, луч мощного лазера. Представим, что интенсивность луча постепенно растет (за счет увеличения мощности лазера или за счет фокусировки излучения). Попробуем представить себе физические процессы, которые будут при этом происходить [5].

Когда интенсивность луча, возрастая, достигнет значения порядка 10^5 Вт/см², начнется плавление металла. Вблизи поверхности, непосредственно под световым пятном, возникнет область жидкого (расплавленного) металла. Поверхность, ограничивающая эту область от твердого металла (ее называют поверхностью расплава), постепенно перемещается в глубь материала по мере поглощения им световой энергии. При этом площадь поверхности расплава увеличивается и, следовательно, теплота начинает более интенсивно отводиться в глубинные области материала за счет теплопроводности. В результате устанавливается неизменная (для данной интенсивности излучения) поверхность расплава (рис. 3.4).

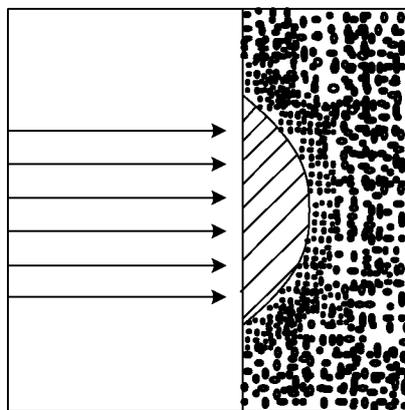


Рисунок 3.4 – Плавление металла под действием лазерного луча

Повысим интенсивность лазерного луча до 10^6 - 10^7 Вт/см². Теперь одновременно с плавлением будет происходить интенсивное испарение (кипение) материала. Часть вещества превратится в пар, вследствие чего на поверхности металла возникнет лунка, начнется процесс формирования отверстия или разреза (рис. 3.5).

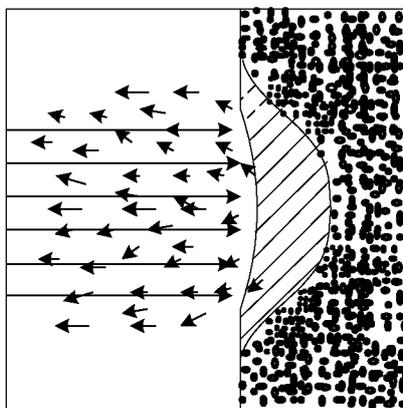


Рисунок 3.5– Интенсивное испарение металла

Когда интенсивность луча достигнет примерно 10^9 Вт/см², свет начнет сильно ионизировать пары вещества, превращая их в плазму. Возникнув, плазма преградит дальнейший доступ лазерного излучения к поверхности материала — ведь свет интенсивно поглощается плазмой (рис. 3.6). При обработке материалов лазерным лучом важно, чтобы не возникала плазма. Значит, интенсивность луча не должна быть чрезмерно большой.

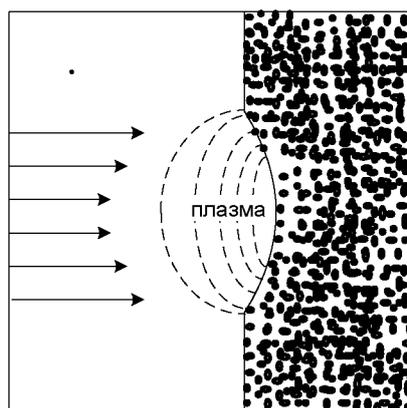


Рисунок 3.6 – Образование плазмы

Говоря о действии луча на вещество, мы пока имели в виду концентрацию световой мощности лишь в пространстве (ведь интенсивность луча есть мощность, отнесенная к единице площади его сечения). Надо, однако, учитывать и концентрацию мощности во времени. Ее можно регулировать,

изменяя длительность одиночных лазерных импульсов или частоту следования импульсов (если генерируется последовательность импульсов).

Предположим, что интенсивность достаточна для того, чтобы металл не только плавился, но и кипел; при этом излучение лазера представляет собой одиночные импульсы длительностью 10^{-7} с.

В данном случае в материале поглощается значительная световая энергия за очень короткое время. За такое время поверхность расплава попросту не успевает переместиться в глубь материала; в результате еще до того, как расплавится сколько-нибудь заметная масса вещества, начнется его интенсивное испарение. Иными словами, основная часть поглощаемой веществом световой энергии лазерного импульса расходуется в подобных условиях не на плавление, а на испарение. На практике при заданной энергии лазерного импульса часто бывает целесообразно позаботиться об увеличении его длительности, чтобы обеспечить достаточное время для перемещения поверхности расплава в глубь образца.

В зависимости от вида обработки и свойств материала надо использовать излучение с вполне определенными энергетическими и временными характеристиками. Если, например, для сварки подходят относительно менее интенсивные и в то же время более длительные импульсы (длительностью 10^{-2} – 10^{-3} с), то для пробивания отверстий, где важно интенсивное испарение материала, подходят более интенсивные и более короткие импульсы (10^{-4} – 10^{-6} с).

3.2.2. Особенности «лазерных сверл»

На циферблате ручных часов, к примеру, системы «Полет», имеется надпись «23 камня». Подобные упоминания о числе камней можно видеть и на циферблатах других механически заводящихся часов.

Речь идет о рубиновых камнях, используемых в часовом механизме в качестве подшипников скольжения. При изготовлении таких подшипников требуется высверлить в рубине (материале весьма твердом и в то же время хрупком) отверстия строго цилиндрической формы диаметром всего 0,1–0,05 мм. Многие годы эта операция выполнялась механическим способом с использованием сверл, изготовленных из тонкой проволоки диаметром 40–50 мкм. Такое сверло делало в минуту до 30000 оборотов и одновременно совершало при этом около 100 возвратно-поступательных перемещений. Для сверления одного камня требовалось до 10–15 минут.

С появлением лазеров с 1964 г. малопроизводительное механическое сверление отверстий в часовых камнях стало везде заменяться лазерным сверлением. Разумеется, термин «лазерное сверление» не следует понимать буквально. Лазерный луч не сверлит отверстие – он его пробивает за счет интенсивного испарения материала.

В настоящее время лазерная пробивка отверстий в рубиновых часовых камнях является обычным делом. Для этой цели применяются импульсные твердотельные лазеры, например лазеры на стекле с неодимом. Отверстие в камне (при толщине заготовки 0,5-1 мм) пробивается серией из нескольких лазерных импульсов, имеющих энергию 0,1-0,5 Дж и длительность порядка 10^{-4} с. Производительность работы лазерной установки в автоматическом режиме – камень в секунду. Это примерно в тысячу раз выше производительности механического сверления.

Чтобы получить тонкую или тончайшую проволоку из золота, меди, бронзы, вольфрама и других металлов, применяют технологию протягивания (волочения) проволоки сквозь отверстия очень малого диаметра. Эти отверстия (каналы волочения) высверливают в материалах, обладающих особо высокой твердостью, например в сверхтвердых сплавах. Наиболее тверд, как известно, минерал алмаз. Поэтому лучше всего протягивать тонкую проволоку сквозь отверстие в алмазе (сквозь так называемые алмазные *фильеры*).

Только алмазные фильеры позволяют получать проволоку диаметром всего 10 мкм. Но как просверлить тонкое отверстие в таком сверхтвердом материале, каким является алмаз? Механически это сделать довольно трудно. Для сверления одного отверстия в алмазной фильере требуется до 10 часов непрерывной работы. Зато совсем нетрудно «пробить» это отверстие серией из нескольких мощных лазерных импульсов. Как и пробивание отверстий в часовых камнях, эта операция выполняется при помощи импульсных твердотельных лазеров.

Канал волочения в алмазной фильере имеет сложный профиль. Он показан на рис. 3.7,а. Лазерными импульсами пробивают черновой канал в алмазной заготовке. Затем, обрабатывая канал ультразвуком, шлифуя и полируя, придают ему необходимый профиль.

Лазерное сверление широко применяют для получения отверстий не только в твердых и сверхтвердых материалах, но и в материалах, отличающихся повышенной хрупкостью.

В качестве примера укажем на подложки микросхем, изготавливаемые из глиноземной керамики. Из-за высокой хрупкости керамики механическое сверление отверстий в ней выполняют, как правило, на «сыром» материале. Обжигают керамику уже после сверления. При этом происходит некоторая деформация изделия, искажается взаимное расположение высверленных отверстий. При использовании «лазерных сверл» можно спокойно работать с керамическими подложками, которые уже прошли обжиг. Поэтому указанная выше проблема здесь не возникает. С помощью лазеров пробивают очень тонкие отверстия в керамике – диаметром всего 10 мкм. Механическим сверлением такие отверстия получить попросту нельзя. Для лазерной пробивки отверстий в керамических подложках применяют импульсные CO_2 лазеры (при диаметре отверстия порядка 0,1 мм и больше) и импульсные лазеры на рубине или гранате с неодимом (для отверстий меньшего диаметра). На рис. 3.7,б по-

казаны с шестикратным увеличением отверстия диаметром 0,3 мм, пробитые в пластине глиноземной керамики толщиной 0,7 мм с помощью CO₂ лазера.

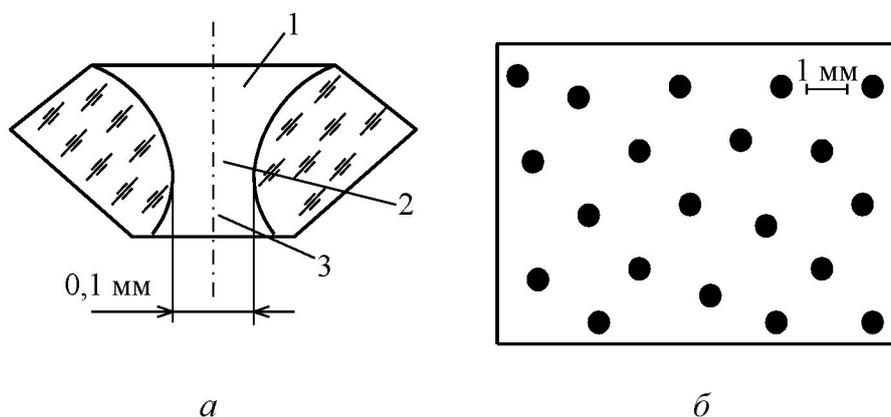


Рисунок 3.7. Лазерное сверление отверстий:
профиль канала волоочения в алмазной фильере (а): 1 – входное отверстие,
2 – рабочая часть канала, 3 – выходное отверстие; отверстия, пробитые
лазерным излучением в пластине глиноземной керамики (б)

Приведенные примеры наглядно демонстрируют преимущества лазерного сверления. Это прежде всего возможность получения отверстий в очень твердых или очень хрупких материалах, а также возможность получения очень тонких отверстий (диаметром до 10 мкм). Отношение глубины пробиваемых лазером тонких отверстий к их диаметру достигает рекордно больших значений (по сравнению с другими методами сверления); глубина отверстия может превышать его диаметр в 10-50 раз. Во всех случаях лазерное сверление отличается высокой производительностью. Наконец, в отличие от обычных сверл «лазерные сверла» не ломаются и не изнашиваются.

На рис. 3.8 показана лазерная установка для сверления отверстий.



Рисунок 3.8 – Лазерная установка для сверления отверстий

3.2.3. Возможность производить сварку через стеклянные перегородки

Предположим, что внутри электронно-лучевой трубки (кинескопа) произошла авария – перегорел или оборвался какой-то провод, нарушился контакт. Трубка вышла из строя. Казалось бы, беда непоправима – ведь поломка произошла в вакууме, внутри стеклянного баллона, и никакому сварщику туда не проникнуть. Однако в него легко может проникнуть лазерный луч. Направляя луч в нужную точку сквозь стекло вакуумного баллона и должным образом фокусируя, можно осуществить необходимый сварочный ремонт (рис. 3.9).

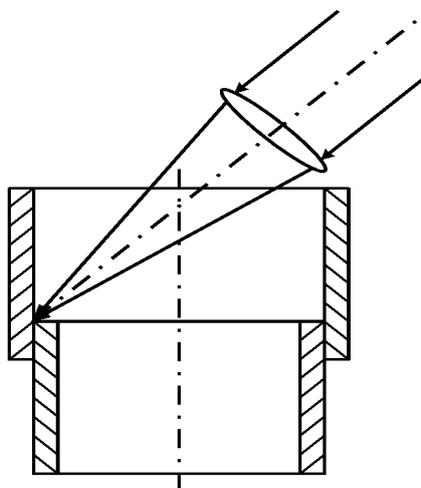


Рисунок 3.9 – Лазерная сварка в труднодоступном месте

Здесь обнаруживается одна из уникальных особенностей лазерного луча – возможность производить сварку через прозрачную для света перегородку, в вакуумированном объеме и вообще в различных труднодоступных местах. Лазерную сварку через прозрачную перегородку применяют не только для восстановительного ремонта электровакуумных приборов. Большой практический интерес представляет сваривание тех или иных элементов микроэлектроники в камере, заполненной инертным газом. В этом случае предотвращаются реакции окисления (рис. 3.10).

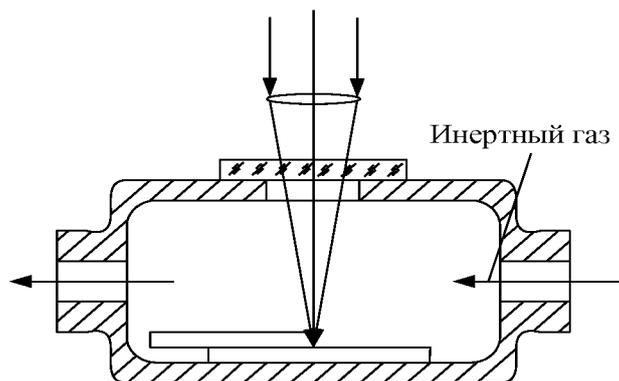


Рисунок 3.10 – Лазерная сварка в камере, заполненной инертным газом

3.2.4. Использование лазеров при изготовлении микросхем

Развитие микроэлектроники органически связано с совершенствованием технологии изготовления микросхем. Большую помощь может оказать здесь лазерный луч. Вначале лазеры применяли лишь для микросварки. Так, при помощи рубинового лазера приваривались вводы к контактам на кремниевых пластинках, приваривались тонкие провода к тонким пленкам. Затем начали применять CO_2 лазеры для пробивания отверстий в керамических подложках для микросхем (о чем мы уже рассказывали).

В настоящее время лазерный луч все чаще используют для подгонки параметров тонкопленочных схем и для изготовления отдельных элементов схемы. С помощью лазера можно целиком изготовить пленочную микросхему – со всеми входящими в нее резисторами, конденсаторами, индуктивностями. Применяя луч лазера, можно изготовить фотошаблон, предназначенный для травления микросхем, или шаблон для напыления компонентов микросхемы на подложку. Во всех этих случаях используется эффект испарения материала под действием мощного лазерного излучения.

Предположим, что на диэлектрическую подложку микросхемы нанесена напылением тонкая металлическая пленка. Перемещая вдоль поверхности пленки сфокусированное на нее лазерное пятно, можно испарить определенные участки пленки и тем самым создать нужный «рисунок» микросхемы. В качестве примера приведем конкретную лазерную установку на основе непрерывно накачиваемого лазера на гранате с неодимом. Лазер генерирует регулярную последовательность световых импульсов с частотой 400 имп/с., Длительность отдельного импульса 10^{-7} с, мощность до 1 кВт. Лазерный луч фокусировали в пятно диаметром 10 мкм. При перемещении пучка происходит испарение узкой полосы металлической пленки; скорость перемещения лазерного пучка составляет 2 мм/с. Полосы на поверхности подложки оказываются практически полностью очищенными от металла.

3.2.5. Порезка материалов лазерным лучом

Лазерным лучом можно резать практически любой материал. Это – ткань, бумага, дерево, резина, пластмасса, керамика, листовой асбест, стекло, листы металла и т.д.

При этом можно получать аккуратные разрезы по сложным профилям. При лазерной резке возгорающихся материалов можно обдуть место разреза струей инертного газа; в этом случае получается гладкий, необожженный край среза.

В качестве примера на рис. 3.11,*а* показан процесс вырезания квадратных отверстий в листе нержавеющей стали толщиной 0,5 мм с помощью CO_2 лазера. На рис. 3.11,*б* приведен выполненный лазерным лучом разрез слюдяного листа толщиной 3 мм по достаточно сложному профилю.

Для резки используются непрерывно генерирующие лазеры либо лазеры, генерирующие последовательность световых импульсов с высокой частотой следования. Требуемая мощность излучения зависит от разрезаемого материала и толщины заготовки.

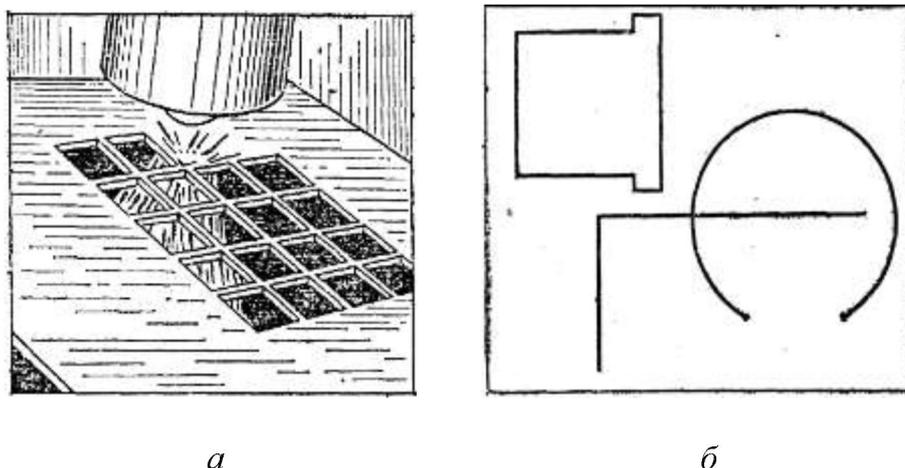


Рисунок 3.11 – Лазерная порезка материалов

Например, для резки досок толщиной 50 мм применяется CO_2 лазер мощностью 200 Вт; ширина разреза составляла 0,7 мм. Для резки листов фанеры толщиной 25 мм применяется CO_2 лазер мощностью 8 кВт; скорость резания 1,5 м/мин. Резка стекла при толщине 10 мм требует более высокой мощности излучения – до 20 кВт.

Лазерная резка металлов может производиться излучением мощностью всего 100-500 Вт, если при этом обдуть разрезаемый материал струей кислорода. В этом случае используют термин «газолазерная резка».

Схема резака для такой резки показана на рис. 3.12. Значительная часть энергии, затрачиваемой на процесс резания, получается здесь за счет экзотермических реакций, в которые вступают металл и кислород; иначе говоря, за счет теплоты, которая выделяется при горении металла в струе кислорода. Кроме того, струя кислорода сдувает и уносит из зоны резания

расплав и продукты сгорания металла, а также охлаждает участки металла, прилегающие к зоне резания. Использование струи кислорода при лазерной резке не только снижает требования к мощности лазера, но одновременно увеличивает глубину и скорость резания, позволяет получать качественную кромку.

Чтобы продемонстрировать, насколько широко используется сегодня лазерная резка, приведем два практических примера, имеющих отношение к совершенно разным областям народного хозяйства.

Первый пример – лазерная резка и раскрой тканей на современной ткацкой фабрике. Устройство включает в себя непрерывно генерирующий CO_2 лазер мощностью 100 Вт, систему фокусировки и перемещения лазерного луча, ЭВМ и систему для натяжения и перемещения ткани. В процессе резания лазерный луч перемещается по поверхности ткани со скоростью до 1 м/с. Диаметр сфокусированного светового пятна равен 0,2 мм. Перемещениями лазерного луча и ткани управляет ЭВМ. Подобное устройство позволяет, например, в течение часа раскроить материал для 50 костюмов. Раскрой производится не только быстро, но и с очень высокой точностью. При этом обеспечивается хорошее качество краев разреза.

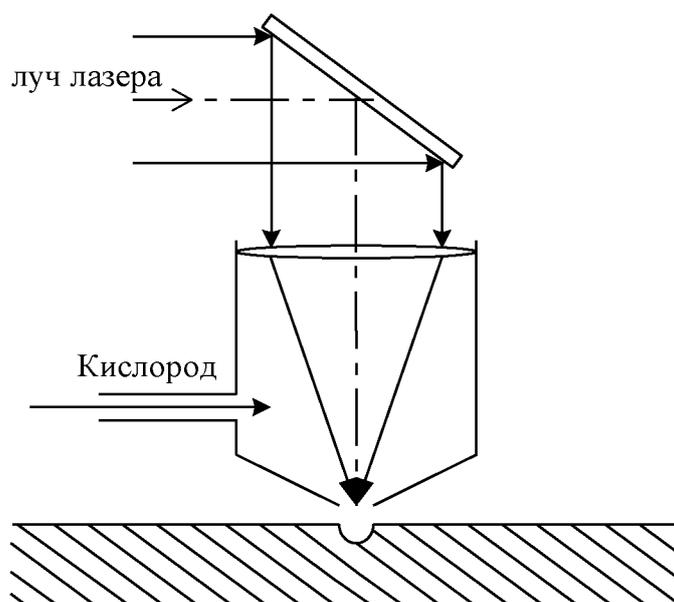


Рисунок 3.12 – Газолазерная резка материалов

Другой пример – применение лазерной резки в авиационной промышленности и, в частности, при производстве космических летательных аппаратов. С помощью лазеров осуществляют автоматизированное разрезание листов титана, стали, алюминия. Непрерывно генерирующий CO_2 лазер мощностью 3 кВт разрезает лист титана со скоростью 3,5 м/мин при толщине листа 5 мм и со скоростью 0,5 м/мин при толщине 50 мм. Используя кислородную струю (в методе газолазерной резки), можно получить

примерно тот же результат при существенно меньшей мощности лазера: 100-300 Вт.

3.2.6. Современные лазерные технологии

Ранее мы познакомились с некоторыми применениями лазерного излучения, имеющими уникальный характер: пробивка тонких отверстий в твердых и хрупких материалах, микросварка миниатюрных деталей, сварка через прозрачную преграду и в труднодоступных местах. Естественно, что в подобных случаях у лазерного луча фактически нет конкурентов. Однако и в обычных ситуациях, где пока еще господствуют традиционные технологии обработки материалов, лазерный луч начинает завоевывать прочные позиции. Так что уже сегодня можно говорить о возникновении и развитии лазерной технологии.

«История техники, – писал российский академик Н.Г. Басов, – свидетельствует о том, что массовое внедрение новых технологических процессов всегда оказывало революционизирующее воздействие на промышленность. Так было при появлении методов скоростного резания, холодной штамповки, точного литья, электродуговой сварки – перечень примеров легко продолжить. В настоящее время промышленная технология во всем мире, по-видимому, находится в преддверии нового качественного скачка, обусловленного широким внедрением лазеров».

От многих новых и новейших промышленных технологий лазерная технология выгодно отличается двумя качествами. Во-первых, она необычайно многогранна, охватывает самые разнообразные процессы обработки материалов. Во-вторых, она исключительно перспективна. Мы являемся свидетелями пока еще только первых шагов лазерной технологии. Но шаги эти весьма впечатляющи, это шаги ребенка, которому суждено стать гигантом.

Современная лазерная технология включает в себя резку материалов, пробивание отверстий, сварку, различные виды термообработки, скрайбирование, маркировку и ряд других процессов обработки материалов. Впечатляет исключительное разнообразие не только процессов обработки, но и обрабатываемых материалов. Лазерным лучом можно обрабатывать практически любой материал.

3.2.7. Лазерная сварка

Развитие лазерной сварки прошло через два этапа. Вначале развивалась *точечная сварка* – на основе импульсных твердотельных лазеров на рубине и на стекле с неодимом. С появлением мощных СО₂ лазеров и лазеров на гранате с неодимом, дающих непрерывное излучение или последовательность часто повторяющихся импульсов, стала развиваться шовная сварка с глубиной проплавления до нескольких миллиметров (и даже сан-

тиметров). Примеры точечной лазерной сварки: соединение никелевого контакта с клеммой из никелевого сплава на основании транзистора, приваривание тонких медных проводов друг к другу или к клеммам, взаимное соединение микросэлектронных компонентов.

Шовная лазерная сварка, с использованием непрерывного излучения мощностью порядка 100 Вт, применяется для герметизации корпусов приборов, приваривания наконечников к лопастям газовых турбин, приварки режущих кромок из закаленной стали к полотнам металлорежущих пил и т. д. Скорость такой сварки достигает нескольких метров в минуту; ширина шва 0,5 мм.

В настоящее время применяется шовная сварка излучением мощностью 1-10 кВт. При этом прочность сварных соединений (ширина шва составляет несколько миллиметров) достигает уровня прочности свариваемого материала. Осуществляется автоматическая лазерная сварка кузовов автомобилей, сварка листов титана и алюминия на судостроительных верфях, сварка газопроводов. На автозаводе имени Лихачева в Москве при помощи CO₂ лазера мощностью 5 кВт производят автоматическую лазерную сварку карданных валов автомобилей. Срок службы валов повысился в три раза. Развивается также лазерная сварка неметаллических материалов. Для сварки деталей из обычного стекла используются лазеры мощностью 100 Вт, для сварки кварца – мощностью 300 Вт.

Лазерная сварка успешно конкурирует с хорошо известными способами сварки – электродуговой, при помощи электронного пучка. Она обладает рядом преимуществ, которые делают ее во многих случаях предпочтительной или даже единственно возможной.

О некоторых уникальных особенностях лазерной сварки мы уже говорили. Дополнительно заметим, что при лазерной сварке нет контакта со свариваемым образцом, а поэтому нет опасности его загрязнения какими-либо примесями. В отличие от электронной сварки, для которой нужен вакуум, лазерная сварка производится в атмосфере. Лазерная сварка позволяет осуществлять быстро и с высокой точностью локальное проплавление в данной точке или вдоль заданной линии. Подвергающаяся тепловому воздействию зона имеет очень малые размеры, что важно, в частности, в тех случаях, когда сварка производится в непосредственной близости от чувствительных к нагреву элементов.

3.2.8. Термообработка

Когда лазерный луч падает на поверхность металла, быстро нагревается тонкий приповерхностный слой в том месте, куда направлен луч. По мере перемещения луча на другие участки поверхности происходит быстрое остывание нагретого участка. Это используют для закалки поверхностных слоев, приводящей к существенному повышению их прочности.

Лазерная закалка позволяет избирательно увеличивать прочность именно тех участков поверхности, именно тех деталей, которые в наибольшей мере подвергаются износу. Так, лазерную закалку применяют в автомобильной промышленности – для упрочнения головок цилиндров двигателей, направляющих клапанов, шестерен, распределительных валов и т. д.

Для повышения твердости поверхности применяют также лазерное легирование. Легирующие присадки в виде порошка предварительно наносят на обрабатываемую поверхность. При облучении лазером происходит плавление и взаимное перемешивание порошка и материала детали в пределах тонкого приповерхностного слоя.

Термообработку обычно производят непрерывно генерирующим CO₂ лазером мощностью порядка 1 кВт. В последние годы появились новые лазерные технологические процессы, относящиеся к термообработке.

Один из таких процессов – *лазерное остекловывание металлов*. Если очень быстро охладить нагретую лазерным лучом поверхность металла, то возникнет тонкий приповерхностный аморфный (стеклообразный) слой, отличающийся высокой прочностью и коррозионной стойкостью. Охлаждение поверхности металла должно происходить со скоростью не менее 10⁸ градусов в секунду.

Другой пример – *поверхностное упрочнение металлов* ударными волнами при использовании лазеров, генерирующих последовательности импульсов. При интенсивности излучения 10⁹-10¹⁰ Вт/см² у поверхности металла образуется слой плазмы. Плазма распространяется навстречу лазерному лучу; в результате рождается ударная волна. Поскольку луч представляет собой последовательность импульсов, возникает последовательность ударных волн. Пиковые давления на поверхность достигают сотен атмосфер. Воздействие на металлическую деталь оказывается в данном случае таким же, как при холодной обработке металла давлением.

К другим процессам обработки можно отнести следующие. При обработке хрупких материалов (керамики, стекла, кремния) широко применяют *скрайбирование* – нанесение на поверхности материала канавок или пробивка ряда близко расположенных отверстий, после чего материал легко надламывается и раскалывается вдоль линии скрайбирования. Хорошо известный всем пример скрайбирования – использование алмаза при резании оконного стекла. В настоящее время широко развивается лазерное скрайбирование на основе применения CO₂ лазеров, работающих в непрерывном режиме либо режиме повторяющихся импульсов.

Лазеры находят широкое применение при *маркировке* различных промышленных изделий в тех случаях, когда изделия имеют малые размеры или очень хрупки, а также если требуется высокая скорость маркировки.

Отметим также отличающуюся высокой надежностью *лазерную зачистку проводов* в авиационной промышленности. Здесь используется тот факт, что излучение CO₂ лазера хорошо поглощается органическим мате-

риалом (изоляцией провода) и отражается от поверхности металла. Лазер обеспечивает высокую чистоту поверхности и не оказывает вредного воздействия на металл проволоки (не образуются «задиры», не происходит обрыв провода).

Перспективы лазерных технологий состоят в следующем:

- разнообразие возможных процессов обработки и разнообразие обрабатываемых материалов (включая материалы, которые вообще не поддаются обычной механической обработке);
- высокая скорость выполнения операций по обработке материала;
- возможность автоматизации операций и, как следствие, существенное повышение производительности труда;
- высокое качество обработки (прочность сварных швов, гладкость срезов, отсутствие загрязнений обрабатываемой поверхности);
- возможность высокоточной прецизионной обработки;
- селективность (избирательность) воздействия, когда обрабатываются лишь определенные участки поверхности, а соседние участки не подвергаются при этом каким-либо воздействиям;
- возможность осуществления дистанционной (на расстоянии) обработки материала;
- возможность выполнения ряда уникальных операций.

3.3. ЛАЗЕРНЫЕ ГИРОСКОПЫ

Лазерный гироскоп — это лазер с кольцевым резонатором. Такой резонатор содержит три или более зеркал, расположенных в одной плоскости таким образом, чтобы излучение циркулировало по замкнутому контуру [1, 5].

На рис. 3.13 схематически показан лазерный гироскоп с трехзеркальным резонатором. Траектория излучения в резонаторе соответствует периметру равностороннего треугольника.

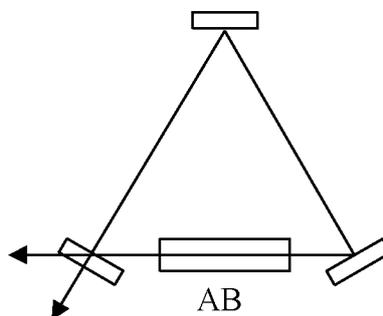


Рисунок 3.13 – Лазерный гироскоп с трехзеркальным резонатором и активным веществом АВ

В лазере с кольцевым резонатором генерируются две бегущие световые волны, распространяющиеся внутри резонатора навстречу друг другу. Одна обегает резонатор в направлении по часовой стрелке, а другая – в обратном направлении.

Пусть ν – частота этих волн. Предположим теперь, что лазерный гироскоп находится на платформе, которая вращается с угловой скоростью Ω вокруг оси, перпендикулярной плоскости резонатора – ее называют осью чувствительности лазерного гироскопа (рис. 3.14). В этом случае частоты бегущих волн, генерируемых в лазерном гироскопе, оказываются разными.

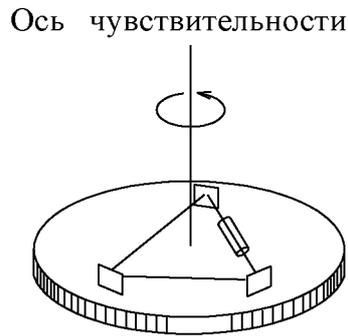


Рисунок 3.14 – Лазерный гироскоп на вращающейся платформе

Волна, которая обегает резонатор в направлении, совпадающем с направлением вращения платформы, имеет частоту:

$$\nu_1 = \nu (1 - 2\Omega S / cL), \quad (3.10)$$

а встречная волна имеет частоту:

$$\nu_2 = \nu (1 + 2\Omega S / cL). \quad (3.11)$$

В этих выражениях S – площадь многоугольника (в данном случае треугольника), по периметру которого распространяется излучение, L – длина периметра, c – скорость света.

Сдвиг частоты волн во вращающемся кольцевом резонаторе можно рассматривать как проявление эффекта Доплера.

Из приведенных соотношений следует, что разность частот встречных бегущих световых волн равна:

$$f = \nu_2 - \nu_1 = 4\nu\Omega S / cL. \quad (3.12)$$

Эти волны выводятся из резонатора, совмещаются друг с другом и падают в фотоприёмник. В результате интерференции волн фотоприемник регистрирует колебания световой интенсивности с частотой f (это есть частота биений). Измеряя f , можно рассчитать угловую скорость Ω .

Таким образом, лазерные гироскопы могут использоваться (и действительно широко используются) в качестве измерителей угловой скорости вращающихся тел. Диапазон измеряемых ими угловых скоростей весьма широк – примерно от 10^{-6} до 10 рад/с; погрешность измерения – до 10^{-8} рад/с. Лазерные гироскопы могут измерять даже угловую скорость вращения Земли.

В современных конструкциях лазерных гироскопов обычно применяется трехзеркальный резонатор; в качестве активной среды используют смесь гелия и неона.

Гироскоп изготавливают в сплошном куске кварца, вытачивая внутри соответствующие каналы для световых лучей и полости для размещения в них электродов. К обработанной кварцевой заготовке после монтажа электродов прикрепляют в соответствующих местах зеркала резонатора, затем откачивают внутренние полости и заполняют их смесью гелия и неона.

На рис. 3.15 дан в упрощенном виде разрез такой конструкции лазерного гироскопа. Он очень компактен и надежен в работе, умещается буквально на ладони человека.

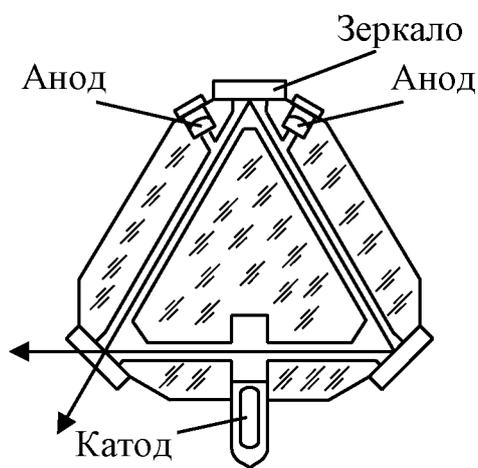


Рисунок 3.15 – Разрез применяемой на практике конструкции лазерного гироскопа

Лазерные гироскопы находят разнообразные применения. Они используются, например, в качестве гироскопов – навигационных приборов, позволяющих, в частности, определять направление на север.

Существуют разные практические схемы *лазерных гироскопов*. Простейший вариант таков. Ориентируют плоскость кольцевого резонатора таким образом, чтобы его ось чувствительности оказалась в плоскости горизонта, и измеряют соответствующую составляющую угловой скорости вращающегося тела.

щения Земли. Затем постепенно поворачивают гироскоп так, чтобы ось чувствительности, изменяя направление, все время оставалась в горизонтальной плоскости. Находят такое положение, когда регистрируемая гироскопом составляющая угловой скорости вращения Земли оказывается наибольшей (по сравнению с другими положениями). Направление оси чувствительности гироскопа в данном положении и будет направлением на север.

Любой находящийся в полете аппарат (самолет, ракета, искусственный спутник Земли) при отклонениях от прямолинейной траектории совершает вращательные движения в той или иной плоскости.

Контролируя угловую скорость и углы поворота при всех этих движениях, можно тем самым контролировать как траекторию полета аппарата, так и его ориентацию в пространстве.

Вот почему лазерные гироскопы широко используются в качестве бортовой аппаратуры ориентации и наведения в современной авиации и в космонавтике. При этом применяют *трехмерные гироскопы* – гироскопы с тремя кольцевыми резонаторами, плоскости которых взаимно перпендикулярны. Они выполняются в сплошном кварцевом блоке в виде шара, в котором высверливаются каналы для световых лучей в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Именно такие лазерные гироскопы позволяют контролировать повороты аппарата во всех трех измерениях.

Например, аналогичный трехкоординатный гироскоп использовался в качестве резервной системы лунной посадочной кабины корабля «Аполлон» (США). Блок гироскопа имел следующие характеристики: масса – 8,5 кг, габаритные размеры – 12×21×31 см, потребляемая мощность – 75 Вт, суммарная погрешность измерения Ω составляла $1,7 \cdot 10^{-3}$ рад/ч.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем состоит суть голографии?
2. Что такое голограмма?
3. Поясните два этапа создания голограммы.
4. Назовите основные свойства голограмм.
5. Назовите основные виды голограмм.
6. Поясните принцип получения осевой голограммы.
7. Поясните принцип получения внеосевой голограммы.
8. Назовите области применения голографии.
9. Как действует на вещество мощный лазерный луч?
10. Объясните принципы лазерного сверления отверстий.
11. Укажите области применения лазерного сверления.
12. Поясните принципы лазерной сварки.
13. Как режут различные материалы лазерным лучом?
14. Поясните суть современных лазерных технологий.

15. Какие виды лазерной сварки вы знаете?
16. Назовите типы лазеров, применяемых в лазерных технологиях.
17. Поясните принцип действия лазерного гироскопа.
18. В чем отличие одно– и трехмерных гироскопов?
19. Поясните конструктивные особенности лазерных гироскопов.
20. Как определить скорость вращения платформы при помощи лазерного гироскопа?
21. Укажите области применения лазерных гироскопов.